



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**Modelos de distribución de especies en escenarios de
tiempo y espacio:
El caso de la garrapata del ganado *Rhipicephalus (Boophilus)*
microplus (Canestrini, 1888)**

Luz Astrid Pulido Herrera

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Biología
Bogotá, Colombia
2016

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio:
El caso de la garrapata del ganado *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* (Canestrini, 1888)

Luz Astrid Pulido Herrera

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Doctor en Ciencias – Biología

Director:

Dr. Agustín Rudas LI

Profesor Asociado

Instituto de Ciencias Naturales

Codirector:

Dr. Jesús Antonio Betancourt

Investigador Salud Animal

CORPOICA

Línea de Investigación:

Línea Biodiversidad y Conservación

Instituto de Ciencias Naturales

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias – Departamento de Biología

Bogotá, Colombia

2016

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi hermosa y extraordinaria familia, encabezada por mi mamá Rosa quien siempre estuvo conmigo en este proceso, apoyándome con su amor incondicional, reconfortándome en los momentos de frustración y decepción animándome a continuar y no dejar abandonado este proceso. A mi hermana Edith, que con sus valiosos consejos académicos me ayudo desbloquear diferentes situaciones tanto personales como académicas que involucraron el desarrollo de este trabajo. A mi hermano Felipe que siempre me alentó con su humor particular, sus palabras amorosas y de aliento en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo personal, moral, académico y profesional de diferentes Seres maravillosos que fui encontrando durante este largo camino de cinco años.

A mi tutor principal el Dr. Agustín Rudas LI, quien desde el inicio de mi proceso me ofreció su ayuda, apoyo y revisión rigurosa y exhaustiva en cada uno de los apartes presentando en el documento; además de apoyarme en los innumerables procesos administrativos requeridos durante todo el programa doctoral.

Al Doctor Jesús Antonio Betancourt, quien gracias a su gestión e interés en mi trabajo viabilizó el pago de mis primeros semestres del programa doctoral, además de facilitar el acceso a la información de línea base para el desarrollo de la investigación, junto con su asesoría técnica y experiencia epidemiológica.

Al Profesor William Grant, de: Department of Wildlife and Fisheries Sciences, Texas A&M University. Quien con su apoyo desinteresado me ayudó a avanzar en el proceso de la modelación dinámica, a la introducción en los modelos basados en agentes e individuos, además de depositar su confianza en mí y mi trabajo junto con la hospitalidad maravillosa que me ofreció durante mi pasantía.

A CORPOICA y al Ministerio de Agricultura por su apoyo económico y logístico.

A Colciencias por su programa de becas para Doctorados nacionales, convocatoria 567, ya que gracias a su financiación pude terminar el proceso de investigación, acceder a la pasantía y terminar mis estudios doctorales.

Al Jardín Botánico de Bogotá *José Celestino Mutis* y su Programa de Estímulos para la investigación Thomas van Der Hammen.

A la Doctora Elizabeth Aguilera quien además de aportarme con sus consejos académicos en nuestras innumerables conversaciones, facilitó el acceso a la información climática sin la cual no hubiera sido posible un acercamiento tan detallado en la región, la cual fue generada por el equipo de agroclimatología de CORPOICA.

A todo el equipo de Profesionales de CORPOICA que participó en el Proyecto “Modelización del efecto del cambio climático sobre la garrapata del ganado *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* en el Trópico Alto Andino”, Jenny Alexandra Herrera, Jesús Alfredo Cortés, Aldemar Zúñiga, Juan Carlos Benavides y Lina de Oro.

A mi amiga y fotógrafa de cabecera Mondy Falla, que me apoyó en la fase de campo exploratoria, y su apoyo moral e incondicional ha sido de gran valor en este proceso.

A Adrián Felipe Benítez por su apoyo de campo en Sotaquirá

A la Dra. Hsiao-Hsuan Wang, del Department of Wildlife and Fisheries Sciences, Texas A & M University, por su apoyo y aporte técnico para el desarrollo los modelos dinámicos.

A la Dra. Ángela Arcila por las observaciones realizadas durante discusiones técnicas.

A Sergio Vílchez, Diego Moreno, Larry Niño, Carlos Pinzón, Alejo Lopera, Edwin Rojas y Douglas Gómez, excelentes amigos y colegas que en los momentos de discusión y resolución de problemas siempre estuvieron atentos y con buena disposición para ayudarme.

A mi compañera de vida Nubia, quien de una u otra manera me acompañó, apoyó, no me dejó desfallecer y me alentó a continuar para terminar este proyecto de vida a pesar de las adversidades y dificultades.

Agradecimientos especiales a Adriana Prieto, quien me apoyó tanto académica como personalmente, impulsándome y motivándome siempre a seguir hasta el último momento de la entrega de este trabajo.

A Jenifer Garza y Carlos Andrés Sierra, con quien compartí los primeros pasos de proceso de modelamiento dinámico, por las discusiones y tardes de trabajo enriquecedoras.

A Katalina Bermúdez, por su apoyo logístico durante la finalización del documento y ajuste de la plantilla final.

A Rufo José, mi compañero incondicional en los trasnochos y madrugadas para cumplir con la finalización de esta investigación.

RESUMEN

Se presenta el análisis de la distribución de la garrapata común del ganado *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* en el Altiplano Cundiboyacense y las causas que la determinan, mediante el uso y aplicación de técnicas de modelamiento estáticas y dinámicas junto con herramientas SIG.

La garrapata común del ganado *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* (*R (B) microplus*) se puede categorizar como especie introducida y corresponde a un ectoparásito hematófago que causa fuertes daños a sus hospederos (bovinos) debido a que transmite agentes infecciosos, como *Babesia* spp y *Anaplasia* spp (Arias *et al.* 1991), que generan lesiones al alimentarse de la sangre de sus hospederos, generando enfermedades como anemia, inapetencia y retardo en su desarrollo.

La premisa con la que inicio este proyecto fue la situación de la ampliación de la distribución altitudinal de esta garrapata en Colombia, que de acuerdo a técnicos e investigadores de diversas instituciones como CORPOICA y el ICA, se ha venido convirtiendo en una situación nueva para las regiones lecheras del país, donde introducciones accidentales de garrapatas debido a movilización de animales desde otras regiones aledañas a la Sabana de Bogotá han afectado las zonas lecheras asentadas en el Altiplano cundiboyacense (CORPOICA 2008). Lo anterior, motivó el interés de utilizar esta especie como objeto de estudio para determinar si la combinación de modelos dinámicos con modelos estáticos, permitiría explicar de manera complementaria los factores determinantes sobre la distribución de ésta especie, teniendo en cuenta dimensiones ecológicas como las interacciones especie – ambiente y su dinámica poblacional, para generar simulaciones con mayor capacidad predictiva y acordes a la realidad, para así responder preguntas como, ¿De qué manera influye la variación ambiental del Altiplano Cundiboyacense sobre la distribución de la garrapata común del ganado *R (B) microplus*?; ¿Cómo varia el comportamiento de la población de la garrapata común del ganado *R (B) microplus* del Altiplano Cundiboyacense bajo condiciones ambientales locales? y, ¿Cómo explicar los cambios de distribución de especies resultantes de predicciones, desde el concepto de la biología de las especies?

Para responder a las preguntas expuestas, se planteó desarrollar el proyecto mediante la aplicación de tres técnicas de modelamiento biológico como se presenta a continuación:

- Modelos de nicho ecológico para representar la modelación estática, mediante el uso de dos algoritmos de modelamiento de nicho ecológico (Maxent y árboles de clasificación). Los algoritmos fueron complementarios, con rendimientos óptimos y significativos, registrando valores de AUC (0.70 Maxent y 0.90 Árboles de Clasificación), y bajos valores de errores omisión (0.04 % Maxent y 4.6 % Árboles de Clasificación). El paisaje (representado por las coberturas de uso de suelo), junto con la presencia del hospedero, la altitud, la precipitación, la temperatura y la humedad del primer trimestre húmedo, fueron las variables más relevantes en el modelamiento. La región Nor-oriental del Altiplano presenta las áreas potencialmente óptimas para el establecimiento de *Rhipicephalus (Boophilus) microplus*.

- Modelamiento por compartimientos como técnica de modelos dinámicos, para conceptualizar y establecer el comportamiento de la dinámica poblacional de *R (B) microplus*. Se realizaron simulaciones por un periodo de 16 años para identificar y describir la dinámica poblacional de *R (B) microplus* bajo condiciones de clima, paisaje, y densidad del hospedero específicas del Altiplano Cundiboyacense, con el fin de evaluar los efectos de la de estas variables, sobre las tasas de mortalidad y sobrevivencia de los diferentes estados de desarrollo del ciclo de vida de la garrapata. Se identificaron a la temperatura y la precipitación como las variables que determinan el establecimiento de *R (B) microplus* en la región de estudio, donde el aumento de la temperatura influye en el incremento de las poblaciones, mientras que los aumentos de la precipitación influyen en la reducción de las poblaciones. Se evidenció que las poblaciones presentan sus picos de población en los trimestres húmedos y descienden en los trimestres secos.

- Modelo basado en agentes e individuos, como técnica de modelamiento dinámico con el componente espacial incluido. Se desarrolló con base en la conceptualización del modelo por compartimientos, con el propósito de comprender la dinámica espacial y temporal de la población de *R (B) microplus* en una “nueva” área de distribución. El modelo se desarrolló en una cuadrícula que representa las condiciones del Altiplano cundiboyacense, incluye el home range de *Bos taurus*, como especie hospedero de esta garrapata, los estados de desarrollo del parásito y la configuración del paisaje de la región. Se estableció que la presencia, distribución junto con el desplazamiento del hospedero, y la precipitación, son las variables más influyentes en términos de la presencia y establecimiento de esta especie.

Con el desarrollo de este estudio se pudo inferir que: el Altiplano cundiboyacense no cuenta con las condiciones climáticas para un establecimiento exitoso de *R (B) microplus*; adicionalmente, la permanencia de la garrapata en la región está dada más por la presencia del Hospedero, su desplazamiento y distribución a lo largo de la región, que por las mismas condiciones ambientales. De otro lado, es posible el cambio climático no influya positivamente sobre las poblaciones de esta garrapata en la región, ya que al incluir los datos de las proyecciones climáticas para el periodo 2011 -2040, se observa un descenso de las poblaciones de todos los estados de desarrollo (aunque hay que generar un estudio específico para este tema de cambio climático); y por último, la combinación de técnicas de modelamiento biológico (dinámicas y estáticas), generó resultados complementarios que permitieron abarcar procesos complejos de una especie desde diferentes perspectivas, que dieron lugar a conclusiones robustas y confiables, sobre las hechos y causas que están involucrados en la distribución, establecimiento y desarrollo de una especie, lo cual podría aplicarse más adelante a otras especies.

Palabras clave: relación parásito-hospedero, modelamiento biológico, distribución de especies, modelos por compartimentos, modelos basados en agentes e individuos.

ABSTRACT

Analysis of the distribution of the common cattle tick *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* in the Altiplano Cundiboyacense and causes that determine, through the use and application of techniques of static and dynamic modeling with GIS tools is presented.

The common cattle tick *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* (*R (B) microplus*) it can be categorized as introduced species and corresponds to an ectoparasite hematophagous that causes heavy damage to their hosts (cattle) due to transmitting infectious agents, such as *Babesia* spp and ANAPLASIA spp (Arias *et al.* 1991), which generate injury by feeding on the blood of their hosts, causing diseases such as anemia, loss of appetite and delayed development.

Expanding the altitudinal distribution of this tick in Colombia, it has become a new situation for dairy regions of the country; where accidental introductions of ticks due to movement of animals from other regions around the Bogota settled dairy affected areas in the Altiplano cundiboyacense (CORPOICA 2008). This motivated the interest of using this species as a

study to determine whether the combination of dynamic models with static models, so allow completed explain the determinants of the distribution of this species, taking into account ecological dimensions as species interactions - environment and population dynamics simulations to generate more predictive and consistent ability to reality, and thus answer questions like, How influences the Altiplano Cundiboyacense environmental variation on the distribution of the common cattle tick *R (B) microplus* ?; How does the behavior of the population of the common cattle tick *R (B) microplus* Altiplano Cundiboyacense under local environmental conditions? and, ¿How to explain the changes of species distribution predictions resulting from the concept of the biology of the species?

The study involves three biological modeling techniques as presented below: Ecological niche models to represent static modeling using modeling algorithms two niche (Maxent and classification trees). The algorithms were complementary, with excellent and significant returns, registering AUC (0.70 and 0.90 Maxent Classification Trees), and low values of omission errors (0.04% Maxent and 4.6% Classification Trees). The scenery along with the presence of the host, altitude, precipitation, temperature and humidity of the first wet quarter, were the most important variables in modeling. The north-eastern region of the Altiplano has the best potential for the establishment of this species areas.

Modeling for compartment like technique of dynamic models to conceptualize and set the behavior of the population dynamics of *R (B) microplus*. Simulations were performed for a period of 16 years to identify and describe the population dynamics of *R (B) microplus* under conditions of climate, landscape, and density of the specific host the Altiplano Cundiboyacense, in order to assess the effects of these variables on mortality rates and survival of different stages of development life cycle of the tick. They were identified temperature and precipitation as the variables that determine the establishment of *R (B) microplus* in the study area, where the temperature increase affects the increase of the population, while the increase precipitation influence the reduction populations. It was evident that the populations present their peak population in the humid of wettest and quarter in the dry down.

Model based on agents and individuals spatially explicit, as dynamic modeling technique with the spatial component included. It was developed based on the conceptualization compartmental model, in order to understand the spatial and temporal dynamics of the population of *R (B) microplus* in a "new" range. The model was developed on a grid

representing Altiplano cundiboyacense conditions, the home range of *Bos taurus*, as host of this tick species, developmental stages of the parasite and configuration landscape of the region. It was established that the presence, distribution and movement of the host, and precipitation are the most influential variables in terms of the presence and establishment of this species because it was found that with decreasing density of cattle in the region populations of all stages Parasite development decreased, while if the host density was increased parasite populations increased. With respect to precipitation, it was noted that increasing the value of this variable according to the projections established by the IDEAM (2015), populations of all stages of development decreased.

With the development of this study it was inferred that: the cundiboyacense Altiplano has no environmental conditions for a successful establishment of *R (B) microplus*; additionally, the permanence of the tick in the region is given by the presence of the host, and displacement distribution along the region, by the same environmental conditions. On the other hand, it appears that climate change will have a negative effect on this tick populations in the region, since the data include climate projections for the period 2011 -2040, a decrease is observed populations all stages of development; and finally, the combination of biological modeling techniques (dynamic and static), complementary results generated encompass complex processes that allowed a species from different perspectives, leading to robust and reliable conclusions on the facts and causes that are involved in distribution, establishment and development of a sort, which could later be applied to other species.

Keywords: host-parasite relationship, biological modeling, species distribution, compartmental models, agent and Individual based modelling.

CONTENIDO

1. CAPÍTULO INTRODUCTORIO	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. Definición Del Problema	3
1.2.1. Preguntas de investigación	4
1.3. OBJETIVOS	4
1.3.1. Objetivo General	4
1.3.2. Objetivos específicos	4
1.4. MARCO CONCEPTUAL	6
1.4.1. Especies Introducidas	6
1.4.2. La garrapata común del ganado Rhipicephalus (Boophilus) microplus, ¿especie invasora?	7
1.4.3. Teoría de Nicho.....	11
1.4.4. Análisis de Sistemas	15
1.4.5. Modelación dinámica	25
1.5. MARCO METODOLÓGICO	32
1.6. BIBLIOGRAFÍA	36
2. DISTRIBUCIÓN INUSUAL Y POTENCIAL DE LA GARRAPATA COMÚN DEL GANADO (Rhipicephalus (Boophilus) microplus) EN ZONAS TROPICALES DE ALTA MONTAÑA.....	41
2.1. INTRODUCCIÓN	42
2.2. MATERIALES Y MÉTODOS	44
2.2.1. Área de Estudio.....	44
2.2.2. Construcción de los modelos de distribución de R (B) microplus	53
2.3. resultados.....	56
2.4. Discusión.....	64

2.5.	Conclusiones.....	68
2.6.	Bibliografía	72
3.	FACTORES REGULADORES DE LA GARRAPATA COMÚN DEL GANADO PARA EL ALTIPLANO CUNDIBOYACENSE: SIMULACIÓN DE LA DINÁMICA POBLACIONAL DE LA GARRAPATA DEL GANADO <i>Rhipicephalus (Boophilus) microplus</i>	76
3.1.	INTRODUCCIÓN	77
3.2.	materiales y métodos	81
3.2.1.	Área de estudio	81
3.2.2.	Descripción del Modelo.....	82
3.2.3.	Desarrollo del Modelo	86
3.3.	RESULTADOS	91
3.3.1.	Evaluación del Modelo	91
3.3.2.	Análisis de Sensibilidad	94
3.3.3.	Aplicación del Modelo	97
3.4.	Discusión.....	106
3.5.	Conclusiones.....	111
3.6.	BIBLIOGRAFÍA	112
4.	MODELO ESPACIALMENTE EXPLÍCITO DE LA GARRAPATA COMÚN DEL GANADO <i>Rhipicephalus (Boophilus) microplus</i> PARA EL ALTIPLANO CUNDIBOYACENSE	116
4.1.	INTRODUCCIÓN	117
4.2.	MATERIALES Y MÉTODOS	119
4.2.1.	Descripción del Modelo.....	119
4.2.2.	Calibración y Evaluación del modelo	134
4.3.	RESULTADOS	135
4.3.1.	Aplicación del modelo	146
4.4.	DISCUSIÓN	149
4.5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	156

4.6.	BIBLIOGRAFÍA	157
5.	CONSIDERACIONES FINALES	161
6.	ANEXOS.....	165
6.1.	Anexo 1: Ecuaciones y parámetros para el Submodelo 1	165
6.2.	Anexo 2: Ecuaciones y parámetros para el Submodelo 2..	171

LISTA FIGURAS

Figura 1. Barreras y estados de taxón del proceso del establecimiento de especies invasoras. Adaptado de Richardson et al. 2000.	7
Figura 2. Ciclo de vida de (R (B) m). Fuente: De Campos Pereira et al. 2008.....	9
Figura 3. Nicho fundamental tridimensional ortogonal. Un nicho fundamental tridimensional ortogonal; x' puede definir el tamaño del alimento, en este caso el diámetro medio de varias semillas o frutos, en especial bellotas; x'' puede definir la tolerancia a la temperatura, y x''' alguna medida de la densidad de ramas, entre determinados diámetros, por unidad de volumen de espacio físico. Por lo tanto, el eje x' es un eje bionómico, el eje x'' es escenopoético, mientras que el <i>status</i> del x''' no es intuitivamente evidente, aunque resulta claramente significativo (Hutchinson, 1978).	13
Figura 4. Dos nichos fundamentales bidimensionales ortogonales que se superponen en la intersección tiene lugar exclusión competitiva: una especie o la otra resultan eliminadas, o bien ambas se reparten el espacio del nicho, lo que produce sendos nichos efectivos (Hutchinson, 1978).	14
Figura 5. Tipos de Modelos planteados por Levins 1966. R: realidad; P: precisión; G: generalidad. Tomada de Guisan y Zimmermann 2000.	16
Figura 6. Esquema general del modo de referencia para una población.	18
Figura 7. Modelo básico de una población. a. Diagrama de flujo; b. ciclo causal.	19
Figura 8. Procedimiento de los modelos de distribución de especies (MDS). Adaptado de Martínez - Meyer, 2009.....	20
Figura 9. Nicho fundamental y nicho efectivo en dos dimensiones, tomado de Hutchinson, 1978.....	21
<i>Figura 10. Ejemplo del proceso de modelización de nichos ecológicos a partir de presencias observadas, + Registros de ocurrencias de la especie conocidas. Ejemplo del proceso de modelización de nichos ecológicos a partir de presencias observadas, + Registros de ocurrencias de la especie conocidas, elipses sombreados en gris área de distribución ocupada, elipses sin color y sin remarcar áreas abióticamente adecuadas, refiriéndose a nicho fundamental, las elipses remarcadas representan el modelo ecológico de nicho ajustado a los registros de presencia conocidos. Etiquetas 1 hacia 3 se refiere a los diferentes tipos de predicciones generadas por el modelo (adaptado de Pearson (2007) y Peterson et al. 2011.....</i>	22

Figura 11. Diagrama BAM. G, área geográfica dada. A, Abiótico, B. Biótico, M, factores de movimiento y dispersión. Adaptado de: Soberón y Peterson (2005), Jiménez-Valverde (2011) y Peterson et al. 2011.	23
Figura 12. Resumen de los procedimientos para desarrollar la investigación. Estructura metodológica general, para evaluar la distribución y determinantes ambientales de la garrapata común del ganado R (B) microplus, en el Altiplano cundiboyacense.	35
Figura 13. Localización del área de estudio. Se presentan en gama de grises los rangos altitudinales de la región, el área puntuada corresponde a la delimitación del Altiplano, definida como la máscara para el mapeo de coberturas ambientales y modelos de distribución de <i>R (B) microplus</i> . Elaboración propia. Fuente: CORPOICA - IGAC.	44
Figura 14. Variables climáticas de temperatura y precipitación en el Altiplano Cundiboyacense. La información corresponde a los valores del promedio anual para el periodo 1981-2010. Se observa la disminución de la precipitación desde la zona sur hacia el norte del Altiplano y el aumento hacia las regiones laterales este-oeste, permitiendo evidenciar la característica de “isla seca”. Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM; CORPOICA 2012.....	46
Figura 15. Se ilustran los 81 Puntos de muestreo que representan las presencias y ausencias utilizadas para la modelación de la distribución potencial de la <i>garrapata R (B) microplus</i> en el Altiplano Cundiboyacense.	48
Figura 16. Modelo de distribución y áreas potencialmente aptas para la garrapata común del ganado <i>Rhipicephalus Boophilus microplus</i> en el Altiplano Cundiboyacense, generado con: A. Maxent y B. árboles de clasificación.	57
Figura 17. Concordancia de áreas de predicción generada por los dos métodos de modelamiento utilizados. a. Área concordantes entre Maxent y árboles de clasificación; b. Áreas aptas proyectadas por Maxent; c. Áreas aptas proyectadas por los árboles de clasificación; c. Áreas no aptas para Maxent; Áreas no aptas para árboles de clasificación. MX: Maxent. AC: árboles de clasificación.	58
Figura 18. Combinación de áreas proyectadas de acuerdo al enfoque de cada algoritmo. Se presentan las áreas aptas proyectas por Maxent en rojo, y las áreas proyectadas como no aptas por Árboles de clasificación.	60
Figura 19. Porcentaje de contribución de las variables predictivas utilizadas, en el modelo de distribución de <i>R (B) microplus</i> para el Altiplano Cundiboyacense. a. Porcentajes de contribución de las variables en Maxent mediante el método de Jackknife; b. Porcentajes de contribución de las variables ambientales en Random Forest mediante el índice de Gini.	

Para Maxent, las dos primeras variables que más contribuyen son Coberturas, Precipitación del segundo trimestre húmedo (SON: Septiembre, octubre, noviembre). Mientras que para Random Forest, las dos variables que más contribuyen son Coberturas y Altitud.	61
Figura 20. Análisis comparativos del rendimiento de Maxent y árboles de clasificación, mediante el análisis del área bajo la curva (AUC) y correlaciones de Pearson. A. Maxent; B. árboles de clasificación. 1. AUC; 2. Pruebas de bondad de ajuste; 3. Sensibilidad y especificidad; 4. Coeficiente de correlación de Pearson.	63
Figura 21. Zonas potenciales de entrada de los bovinos al Altiplano y centro de acopio dentro de la región. Se incluyen las carreteras y los departamentos de origen con el fin de evidenciar las rutas de acceso a la región. Las flechas indican las principales puertas de entrada hacia el centro de acopio más grande de la región. Fuente de carreteras: Ministerio de Transporte – IGAC 2006.	67
Figura 22. Zonas aptas Vs. Coberturas de uso de suelo. Se observa que la localización de las áreas aptas coincide con coberturas de uso de suelo que presentan condiciones favorables para el desarrollo de estados de fase de vida libre, como los mosaicos de pastos y áreas naturales, cultivos y áreas naturales, bosques y arbustales.	69
Figura 23. Localización del área de estudio. En verde delimitación del Altiplano Cundiboyacense. Fuente, CORPOICA, 2012.	82
Figura 24. Conceptualización del modelo de dinámica de población para <i>R (B) microplus</i> . Adaptado de Mount <i>et al.</i> 1991. AGS : Acumulación de grados semana; O : Oviposición; S : Supervivencia; M : Mortalidad; T : Temperatura; DS : Déficit de saturación; IP : Índice de precipitación; ET : Efecto de la temperatura; DLA : Densidad de larvas; FEH : Factor de encuentro con el hospedero; BTFEH : Base de la tasa del factor de encuentro; DH : Densidad de hospedero; FA : Factor de ajuste.	84
Figura 25. Comportamiento estacional de las poblaciones de estados de vida libre de <i>R (B) microplus</i> , resultantes del modelo. Huevos y larvas y teleoginas. PTS : Primer semestre seco (diciembre- enero - febrero); PTH : Primer trimestre húmedo (marzo – abril - mayo); STS : Segundo trimestre seco (junio – julio - agosto); STH : Segundo trimestre húmedo (septiembre – octubre -noviembre).	93
Figura 26. Análisis de sensibilidad. Comportamiento para la serie de 16 años (832 semanas) de la población de <i>R (B) microplus</i> en el Altiplano Cundiboyacense, bajo diferentes valores del factor de ajuste (FA). Se observa que independiente del valor del FA las poblaciones mantienen una dinámica temporal similar, pero el número de individuos varia ya sea por incremento o disminución. Se incluye el FA 0.07, para ilustrar la desaparición de la	

población en el tiempo con un valor < 0.08 , a partir del FA 0.08 las poblaciones de mantienen y son más estables y se asume como el más ajustado para para las condiciones del Altiplano; 0.09, presenta valores cercanos a condiciones óptimas para el desarrollo R (B) microplus, mientras que 0.1 Supera los valores poblacionales a condiciones óptimas de desarrollo de la especie.....95

Figura 27. Comportamiento estacional de la población de estados de vida libre de R (B) microplus en el Altiplano Cundiboyacense, bajo los valores de FA evaluados en el análisis de sensibilidad. PTS, Primer Semestre Seco; PTH, Primer Trimestre Húmedo; STS, Segundo Trimestre Seco; STH, Segundo Trimestre Húmedo.....96

Figura 28. Comportamiento de las poblaciones de estados de vida libre, a. huevos, larvas; b. teleoginas, bajo diferentes temperaturas (Línea base; incremento de 1° ($+1^{\circ}\text{C}$); incremento de 2° ($+2^{\circ}\text{C}$), para el FA más acorde con las condiciones del altiplano 0.08. Se observa que al aumentar la $T^{\circ}\text{C}$ se incrementan las poblaciones de los tres estados. PTS, Primer Semestre Seco; PTH, Primer Trimestre Húmedo; STS, Segundo Trimestre Seco; STH, Segundo Trimestre Húmedo.99

Figura 29. Comportamiento de las poblaciones de estados de vida libre, a. huevos, larvas; b. teleoginas, bajo diferentes valores de Índices de precipitación, IP Línea base; IP 1: incremento de 6.2 en el promedio del índice (el incremento del IP se basó en los cambios de precipitación para la región, calculados por el IDEAM 2015 para el periodo 2011 - 2040). Se observa que al aumentar el IP disminuyen las poblaciones de los tres estados, mientras que si disminuye el IP aumentan las poblaciones de los tres estados. PTS, Primer Semestre Seco; PTH, Primer Trimestre Húmedo; STS, Segundo Trimestre Seco; STH, Segundo Trimestre Húmedo.100

Figura 30. Comportamiento de las poblaciones de estados de vida libre, a. huevos, larvas; b. teleoginas, bajo diferentes valores de Índices de precipitación y Temperatura, el cambio de los valores, se basaron en los cambios de precipitación y temperatura para la región, calculados por el IDEAM 2015 para el periodo 2011 - 2040. Se observa que al aumentar el IP disminuyen las poblaciones de los tres estados, mientras que si disminuye el IP aumentan las poblaciones de los tres estados. PTS, Primer Semestre Seco; PTH, Primer Trimestre Húmedo; STS, Segundo Trimestre Seco; STH, Segundo Trimestre Húmedo. 101

Figura 31. Comportamiento de las poblaciones de huevos - larvas, bajo diferentes condiciones de paisaje línea base; P1: incremento de áreas óptimas a 0.60; P2: reducción de áreas óptimas a 0.30, para el FA más acorde con las condiciones del altiplano 0.08. Se

observa que al aumentar la proporción de las áreas óptimas aumenta la población (P1), mientras que sí, se reduce la proporción de áreas óptimas la población decrece.	103
Figura 32. Comportamiento de las poblaciones de larvas, ninfas y adultos sobre el hospedero Línea base; DH1: incremento a 1; DH2: reducción a 0.5), para el FA más acorde con las condiciones del Altiplano 0.08. LonH : Larvas sobre hospedero; NonH : Ninfas sobre hospedero; AonH : Adultos sobre hospedero.	105
Figura 33. Comportamiento de las poblaciones de estados de vida libre, con respecto a las variables climáticas. a. Temperatura (T°C); b. Déficit de saturación mm/Hg (DS); c. Índice de precipitación (IP).	107
Figura 34. Modelo conceptual que representa la interacción entre las condiciones de clima, la estructura del paisaje, el hospedero y la garrapata del ganado Rhipicephalus (Boohpilus) microplus para el Altiplano cundiboyacense. Adaptado de Wang et al. 2012.	121
Figura 35. Resumen de entidades, variables de estados y escala, del modelo. H1, H2, H3, se refieren a los tipos de hábitat, el punto negro hace referencia al hospedero, el asterisco representa al parásito (R (B) microplus), la gota de agua representa la presencia del recurso agua y, (x, y) representan las coordenadas de localización. a. Cuadrícula para descripción de configuración del paisaje, agentes y entidades; b. conceptualización de los procesos del ciclo de vida de R (B) microplus, que se ejecutan en la cuadrícula en cada una de las celdas de hábitat que componen el paisaje.	123
Figura 36. Representación de la escala espacial del altiplano cundiboyacense en el modelo. a. Ráster del altiplano cundiboyacense utilizado en el software de modelamiento NetLogo 5.2.0. b. Corte de una porción de la región que permite observa el tamaño de las celdas del ráster 30x30m. W se refiere al hábitat adecuado; B , se refiere al hábitat medianamente adecuado; 1, representa el hospedero	125
Figura 37. Resumen de los procesos y programación del modelo espacial, para R (B) microplus, para el Altiplano cundiboyacense. Se representan los procesos consecutivos tenidos en cuenta.	127
Figura 38. Interface de NetLogo donde se desarrollan los procesos de la dinámica de población de R (B) microplus. 1. Monitores que registran los cambios comportamentales de la población durante la simulación; 2. Mundo, espacio geográfico donde se desarrollan los procesos del ciclo de vida de R (B) microplus.	128
Figura 39. Ciclo de vida de la garrapata del ganado R (B) microplus.	130
Figura 40. Simulaciones de la densidad de población de los estados de vida libre (a), huevos y larvas, y de los estados parasíticos (b), larvas sobre el hospedero, ninfas y adultos, bajo	

tres valores diferentes de tasas del factor de encuentro con el hospedero, ninfas y adultos, bajo tres valores diferentes de tasas del factor de encuentro con el hospedero, en el Altiplano cundiboyacense.	136
Figura 41. Simulaciones de la densidad de población de Teleoginas bajo tres valores de tasas de encuentro con el hospedero, en el Altiplano Cundiboyacense.	137
Figura 42. Resultados de la distribución, y prueba de significancia Kolmogorov-Smirnov para los estados de vida libre (huevos, larvas, teleoginas) bajo los tres factores de tasa de encuentro con el hospedero (BTFEH) evaluados (0.07, 0.08, 0.009). Se utilizó un intervalo de confianza $p = \leq 0.05$, se observa no existen diferencias significativas entre los factores para los estados de vida libre con $p = 0.97 - p = 0.998$	138
Figura 43. Resultados de la distribución, y prueba de significancia Kolmogorov-Smirnov para los estados de vida parasíticos (larvas sobre el hospedero) bajo los tres factores de tasa de encuentro con el hospedero (BTFEH) evaluados (0.07, 0.08, 0.009). Se utilizó un intervalo de confianza $p = \leq 0.05$, se observa existen diferencias significativas entre los factores 0.07 y 0.08 con $p = 0.0266$, mientras que para 0.09 y 0.08 no se presentaron diferencias significativas con $p = 0.152$	139
Figura 44. Distribución espacial de la densidad poblacional de los estados vida libre, huevos, larvas y teleoginas. a. huevos, b. larvas, c. teleoginas. La distribución se encuentra relacionada con los tipos de hábitat, presentándose las mayores densidades poblacionales en hábitat con características arbóreas.	140
Figura 45. Densidades poblacionales de larvas, huevos, larvas sobre el hospedero, ninfas y adultos sobre el hospedero, de acuerdo a la densidad del hospedero 0.73 línea base, 0.05 escenario de disminución de la densidad de hospedero, y 1 escenario de incremento d de densidad del hospedero. La densidad poblacional de todos los estados de desarrollo, disminuye bajo el escenario de disminución, mientras que, si se incrementa la densidad del hospedero, las poblaciones del parásito aumentan. a. Línea base de densidad del hospedero; b. escenario de aumento de la densidad del hospedero a 1/ha; c. escenario de disminución del hospedero a 0,5/ha.	142
Figura 46. Densidades poblacionales de teleoginas, de acuerdo a la densidad del hospedero 0.73 línea base, 0.05 escenario de disminución de la densidad de hospedero, y 1 escenario de incremento de densidad del hospedero. La densidad poblacional de este estado de desarrollo, disminuye bajo el escenario de disminución, mientras que bajo el escenario de incremento del hospedero aumenta.	143

Figura 47. Densidades poblacionales de huevos y larvas, de acuerdo al paisaje y preferencias de hábitat, línea base es el paisaje “actual”, paisaje 1, se refiere al incremento al 70% de la cobertura de pastos y áreas abiertas. La densidad poblacional disminuye, si se incrementan las áreas de pastos y áreas abiertas y poco favorables para *R (B) microplus*.

.....144

Figura 48. Densidades poblacionales de huevos y larvas y teleoginas, de acuerdo al paisaje y preferencias de hábitat, línea base es el paisaje “actual”, paisaje 1, se refiere al incremento al 70% de la cobertura de pastos y áreas abiertas. Se observa que, para el escenario de cambio, las poblaciones de huevos tienden a mantenerse con valores iguales en las áreas de pastos con respecto a la línea base, mientras que en las áreas de arbustales hay una tendencia a aumentar la densidad poblacional para estos estados de vida libre. A. escenario línea base; b. paisaje 1, reconfiguración del paisaje incremento al 70% de la cobertura de pastos y áreas abiertas; c. densidades poblacionales de teleoginas en los tres tipos de hábitats, bajos los dos escenarios de paisaje.145

Figura 49. Densidades poblacionales de estados de vida libre, bajo los escenarios de cambio de clima. Se observa la disminución de las poblaciones de huevos, larvas y teleoginas bajo un escenario de cambio de clima para el 2011 – 2040 de acuerdo a los valores proyectados para temperatura y precipitación. a. Huevos y larvas para los dos escenarios de clima, línea base y proyección de los modelos de escenarios de cambio climático; b. teleoginas para los dos escenarios de clima, línea base y proyección de los modelos de escenarios de cambio climático; c. Comportamiento estacional de las poblaciones de larvas y huevos para los dos escenarios de clima, línea base y proyección de los modelos de escenarios de cambio climático. PTS: Primer semestre seco (diciembre-enero - febrero); PTH: Primer trimestre húmedo (marzo – abril - mayo); STS: Segundo trimestre seco (junio – julio - agosto); STH: Segundo trimestre húmedo (septiembre – octubre -noviembre).....147

Figura 50. Densidades poblacionales de estados de huevos y larvas, con respecto a las variables climáticas de precipitación y temperatura de manera independiente. a. Escenarios de temperatura, línea base, incremento de 1°C. b. Escenarios de precipitación, línea base, incremento de 6,2.148

Figura 51. Comportamiento estacional de los estados de vida libre de la garrapata común del ganado *Rhipicephalus (Boophilus) microplus*, en el Altiplano Cundiboyacense. a. Huevos – larvas; b. Teleoginas. Elipses rojas, meses secos; elipses azules, meses húmedos.153

Figura 52. Comportamiento de la temperatura media anual y del índice de precipitación del Altiplano Cundiboyacense, para una tendencia de 30 años. Elaboración propia. Fuente: CORPOICA 2012.....	154
Figura 53. Comportamiento de la temperatura mínima promedio y de la temperatura máxima promedio en el Altiplano Cundiboyacense para una tendencia de 30 años. Elaboración propia. Fuente: CORPOICA 2012.	155
Figura 54. Resultados del modelamiento de distribución de especies y de la dinámica de población basada en agentes e individuos de la garrapata común del ganado R (B) microplus para el Altiplano Cundiboyacense. Los circulo resaltan como la preferencia de los estados de vida libre de la garrapata reflejada en los mayores valores de individuos, coinciden con las áreas potencialmente aptas resultantes de los modelos de distribución de especies desarrollados en el presente proyecto.	164

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Categorías y elementos del protocolo ODD (Grimm et al. 2010, Railsback y Grimm 2011).....	27
Tabla 2. Variables climáticas incluidas en el proceso de modelación de la distribución de R (B) microplus para el Altiplano Cundiboyacense.	51
Tabla 3. Variables fisiográficas y biológicas incluidas en el proceso de modelación de la distribución de R (B) microplus para el Altiplano Cundiboyacense. Fuentes: IGAC - CORPOICA 2002, IDEAM et al. 2002, MADR 2006, SRTM. Todas las variables se representan con una resolución espacial de 30m.	52
Tabla 4. Resumen de las etapas del ciclo de vida de R (B) microplus para diferentes regiones de Colombia (Fuente: Betancourt, 2004).....	80
Tabla 5. Parámetros para periodos de desarrollo por fase y estado del ciclo de vida de R (B) microplus, definidos para el modelo de dinámica de población en el Altiplano. AGS, Acumulación de grados semana. Adaptado de Mount et al. 1991.	86
Tabla 6. Categorías y porcentaje de las preferencias de hábitat para <i>R (B) microplus</i> en el Altiplano Cundiboyacense, Colombia. Cálculos de porcentaje para las tres categorías definidas a partir del planteamiento de Teel <i>et al.</i> (1996.- 1997), hábitats favorables, hábitats medianamente favorables, hábitats desfavorables. Fuente cartográfica: IDEAM <i>et al.</i> 2002.	90
Tabla 7. Valores de los escenarios de paisaje para la aplicación del modelo de población de R (B) microplus en el Altiplano Cundiboyacense, Colombia.	102
Tabla 8. Tasas de mortalidad obtenidas en el modelo de R (B) microplus para el Altiplano Cundiboyacense. S1, Sobrevivencia 1; S2, Sobrevivencia 2.	109
Tabla 9. Lista de variables de estado, atributos y escala, definidos para el modelo de población de <i>Rhipicephalus (Boophilus) microplus</i> , en el Altiplano Cundiboyacense. Niveles jerárquicos, entidades, variables de estado y atributos incluidos en el modelo.	124

1. CAPÍTULO INTRODUCTORIO

1.1. INTRODUCCIÓN

La garrapata común del ganado *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* (en adelante *R (B) microplus*), se puede categorizar como especie invasora, es un ectoparásito hematófago que causa fuertes daños a sus hospederos (bovinos) debido a que transmiten agentes infecciosos, como *Babesia* spp y *Anaplasia* spp (Arias *et al.* 1991), generando enfermedades como anemia, inapetencia y retardo en su desarrollo.

Estrada Peña (2001) y Estrada Peña *et al.* (2005), sugieren que la garrapata del ganado *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* (Canestrini), presenta una tendencia a aumentar su distribución altitudinalmente en el continente europeo, en Centro y Sur América, debido posiblemente al calentamiento global, ya que según lo planteado por estos autores el cambio y aumento de distribución de esta especie, responde principalmente al aumento de la temperatura.

Un escenario de aumento de distribución altitudinal de la garrapata del ganado repercute en el manejo de los bovinos y la producción de leche afectando no solamente la cadena productiva económicamente y amenazando la seguridad alimentaria humana. El establecimiento de esta garrapata en nuevas regiones de Colombia es preocupante puesto que podría presentarse una posible transmisión de hemoparásitos dañinos para su hospedero (ganado bovino) y que, debido al desconocimiento local de esta especie, llevaría a un manejo improvisado, con tratamientos químicos más frecuentes de lo normal (Ortiz 2004), afectando tanto al ganado y su producción, como el ambiente natural inmediato a la finca.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Los modelos de nicho ecológico o de distribución de especies, son importantes herramientas que se han venido desarrollando durante las últimas décadas para abordar el tema de los cambios de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio. Se definen como algoritmos que predicen la probabilidad de presencia o ausencia de una especie a través de un gradiente ambiental o un área geográfica específica (Pearman *et al.* 2008), este tipo de modelación se apoya en los Sistemas de Información Geográfica para así generar distribuciones geográficas potenciales (Graham *et al.* 2004, Guisan y Thuiller 2005).

La teoría de nicho ecológico multidimensional o de “hiper-volumen” (Hutchinson 1978), ha sido el fundamento teórico de la modelación de distribución potencial de especies; sin embargo, a pesar de que este tipo de modelaciones asume procesos ecológicos como un supuesto, estos no son evidentes en los resultados predictivos obtenidos con esas técnicas, ya que los resultados se presentan como “imágenes instantáneas” a intervalos discretos ($t_0 - t_1$). Es por esto que la modelación de distribución de especies, ha sido objeto de diversas críticas, ya que se basa en técnicas que no tienen en cuenta la dinámica de las especies en los sistemas biológicos, solo utiliza series de datos de un momento determinado para hacer conclusiones de los cambios de un sistema de un tiempo y/o espacio a otro sin tener en cuenta el proceso que genera este cambio (Guisan y Zimmermann 2000, Hannon y Ruth 1997, Elith *et al.* 2010).

Los cambios de las especies en el espacio y el tiempo responden a procesos dinámicos, por lo que analizar estos cambios únicamente desde un punto de vista estático, con modelos fenomenológicos, no evidencia los procesos que se llevan a cabo para que una especie conserve o cambie su nicho, en un espacio geográfico. Es por esto que este trabajo propone integrar modelos dinámicos, entendidos como procesos que den respuestas y reflejen interacciones en un tiempo y espacio determinado (Guisan y Zimmermann 2000), para predecir la distribución de especies, y así generar escenarios más realistas y una mejor comprensión de las relaciones inter-específicas y de las especies con su ambiente (Pearson y Dawson 2003).

El propósito de este trabajo fue desarrollar una propuesta que permitiera explicar desde la biología, a que responde la distribución de una especie, involucrando distribuciones

geográficas reales, una dimensión de carácter fisiológico asumida para este trabajo como la relación parásito – hospedero (garrapata – bovinos) y su dinámica de poblaciones en el Altiplano cundiboyacense.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La presencia y distribución de las garrapatas se explican por la presencia de hospederos y la disponibilidad de diversos tipos de hábitat que sean favorables para su establecimiento y mantenimiento (Estrada-Peña *et al.* 2005). En Colombia la ganadería de leche especializada está basada principalmente en animales de la raza Holstein que se ha asentado en los altiplanos y que se ha visto afectada por introducciones accidentales de garrapatas debido a movilización de animales desde otras regiones en fincas aledañas a la Sabana de Bogotá (CORPOICA 2008). La distribución de esta especie que hasta hace 20 años se venía presentando en zonas bajas no superiores a los 1800 m, hoy día se observa un aumento en su rango de distribución altitudinal desde Nicaragua hasta Colombia que alcanza los 2800 m; este hecho se ha atribuido al aumento de temperatura relacionándose de esta manera como respuesta al efecto del cambio climático (Estrada-Peña 2001, Ortiz 2004, Estrada-Peña *et al.* 2005, Evans 1978).

Actualmente se utilizan herramientas que generan modelos empíricos estáticos como Bioclim (Busby 1991), Garp (Stockwell 1999), Maxent (Phillips *et al.* 2006), OpenModeller desktop (Muñoz *et al.* 2009) entre otros, basados en variables abióticas (físicas y climáticas), para predecir la distribución potencial tanto temporal como espacial de especies, que a pesar de poder incluir variables biológicas como tipos de vegetación, no se consideran interacciones biológicas y ecológicas en el proceso de la modelación sino que se asumen como un supuesto. En consecuencia, se generan modelos que producen “imágenes instantáneas” (momento y espacio dado), sin considerar la dinámica ecológica de las especies en su ambiente (Davis *et al.* 1998, Pearson y Dawson 2003, Anderson *et al.* 2009, Elith *et al.* 2010).

Por lo anterior, se propone incluir algunas dimensiones ecológicas como las interacciones especie – ambiente y su dinámica poblacional para generar simulaciones de procesos ecológicos con mayor capacidad predictiva. De esta manera se aporta desde el

conocimiento biológico y ecológico de esta especie, al fortalecimiento, calidad y eficiencia de las estrategias de manejo y control que se generen para esta especie. Así mismo, favorecerá la robustez de los sistemas de alerta temprana que de allí se puedan derivar, para afrontar retos como el cambio climático y sus consecuencias en los sistemas productivos. Por otra parte, la generación de estrategias más eficientes, promoverá un uso adecuado de plaguicidas de tal manera que disminuya la afectación de la salud de los agroecosistemas, los productores y los consumidores. Por último, este proyecto pretende generar un mecanismo que facilite la toma de decisiones en el campo pecuario teniendo en cuenta el componente ambiental y biológico del sistema ganadero.

1.2.1. Preguntas de investigación

¿De qué manera influye la variación ambiental del Altiplano Cundiboyacense sobre la distribución de la garrapata común del ganado *R (B) microplus*?

¿Cómo varía el comportamiento de la población de la garrapata común del ganado *R (B) microplus* del Altiplano Cundiboyacense bajo condiciones ambientales locales?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Generar predicciones de distribución de especies que se expliquen desde la biología de las especies

1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de los cambios espacio - ambientales sobre la distribución de la garrapata común del ganado en el Altiplano Cundiboyacense
- Simular el comportamiento de la población de la garrapata común del ganado bajo condiciones ambientales específicas del Altiplano Cundiboyacense

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

- Diseñar una estrategia que dé cuenta de la biología de las especies en los procesos de predicción de distribución de especies

1.4. MARCO CONCEPTUAL

1.4.1. Especies Introducidas

Las especies introducidas o exóticas se definen como las especies que llegan a un lugar más allá de su rango geográfico original y establece poblaciones (Gutiérrez *et al.*, 2010, Meffe y Carroll 1997, Richardson *et al.* 2000). Este fenómeno puede ser el resultado de actividades humanas o como actividad propia de la especie, por otro lado, se caracteriza por causar impactos negativos directos o indirectos sobre los sistemas receptores, afectando la biodiversidad nativa y generando pérdidas económicas. La introducción es una de los requisitos para la invasión de especies, de acuerdo a Richardson *et al.* (2000) para completar el proceso de invasión las especies deben superar diferentes barreras (Figura 1).

Barrera geográfica: determinada como la inmigración o llegada. Las especies atraviesan barreras montañosas, océanos o diferentes barreras biogeográficas con la ayuda voluntaria o accidental debido a las actividades del hombre, esta fase se denomina fase de introducción y se identifican como **especies introducidas**.

Barrera ambiental: Determinada por crecimiento independiente o establecimiento espontáneo. Está relacionada con la superación de las condiciones ambientales que limitan la reproducción de la especie, y logra alcanzar una población mínima viable y el establecimiento permanente, se identifican como **especies establecidas o naturalizadas**.

Barrera de dispersión: Se caracteriza por superar las barreras ya mencionadas, además de enemigos naturales, falta de agentes de dispersión, y se establece en nuevas áreas, en este momento se identifican como especies invasoras,

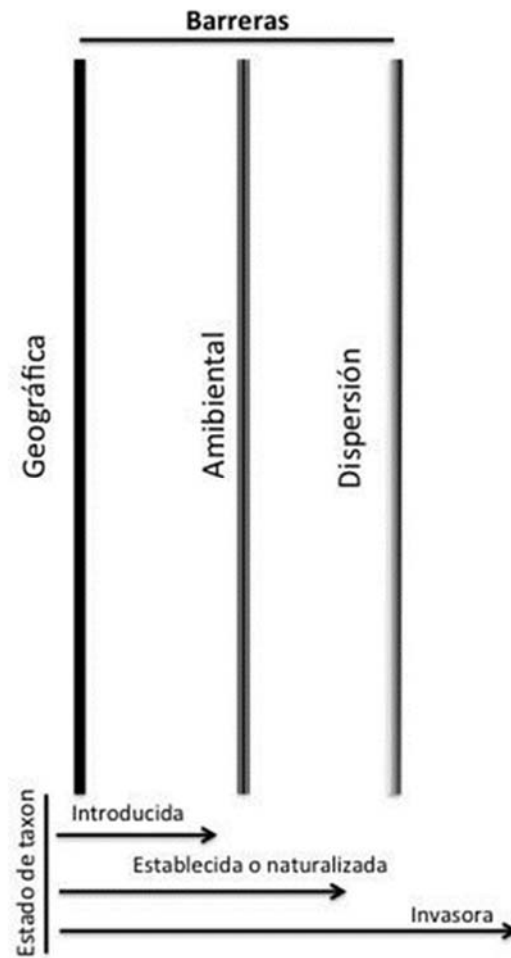


Figura 1. Barreras y estados de taxón del proceso del establecimiento de especies invasoras. Adaptado de Richardson *et al.* 2000.

1.4.2. La garrapata común del ganado *Rhipicephalus (Boophilus) microplus*, ¿especie invasora?

La garrapata común del ganado *Rhipicephalus (Boophilus) microplus*, pertenece a la familia *Ixodidae*, es un ectoparásito hematófago que causa fuertes daños a sus hospederos (bovinos) ya que transmite agentes infecciosos que generan lesiones durante la hematofagia. *R (B) microplus*, es una garrapata de un solo hospedero, donde completa su ciclo de vida el cual se divide en dos fases (Figura 2): **1.** Fase parasitaria, se identifica por ser el período de hematofagia e inicia cuando las larvas se adhieren al hospedero y termina

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

cuando las hembras engordadas y fecundadas (Teleoginas) caen al pasto; y **2.** Fase no parasitaria (desarrollo de estados de vida libre), se desarrolla en el pasto independiente del hospedero, inicia con la ovoposición de las Teleoginas hasta el tercer estadio larvario y adherencia al bovino (Pereira y Labruna 2008, Sutherst 1987). Debido al fuerte impacto económico y en la salud que causa a sus hospederos, es la especie de mayor importancia en epidemiología del ámbito veterinario, puesto que es vector de hemoparásitos como *Babesia* spp y *Anaplasma* spp (Arias *et al.* 1991), que generan lesiones al alimentarse de la sangre de sus hospederos, generando enfermedades como anemia, inapetencia, retardo en su desarrollo, pérdida de peso y en casos extremos causa la muerte (FAO 1984, Guglielmone 1995).

Al parecer los cérvidos fueron los hospederos primitivos de *R (B) microplus*, y la cercana relación entre estos animales y rumiantes domésticos, junto con las modificaciones en los paisajes y ambientes asociados a estos disminuyendo la distancia entre ellos y hace que se presente un desequilibrio Hospedero – parásito y el ganado bovino, se convierta en el principal hospedero actual de esta garrapata (De Campos – Pereira *et al.* 2008). Por otro lado, a pesar de no mantener poblaciones tan grades de este ectoparásito como el ganado bovino, otros animales domésticos como ovinos, caprinos y equinos que son criados en el mismo espacio que los bovinos, podrían ser parasitados por esta garrapata, lo cual podría generar un problema más grande con respecto a su control y manejo.

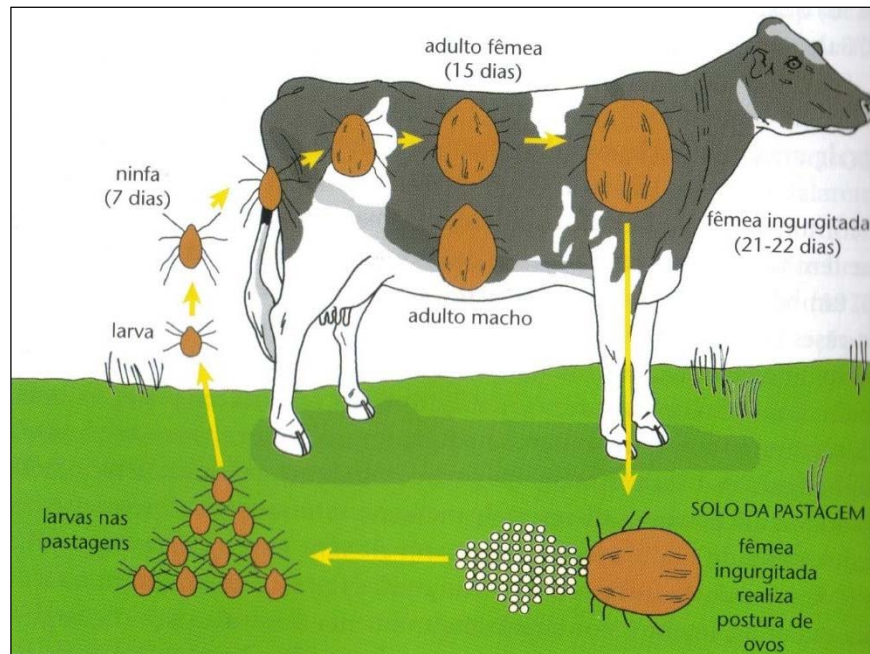


Figura 2. Ciclo de vida de *R (B) microplus*. **Fase parasitaria**: 1. larva adhiriéndose al bovino, 2. ninfa, 3. teleogina en estado final de alimentación, **Fase no parasitaria o de vida libre**: 4. caída de teleogina empezando oviposición, 5. huevos en el suelo en periodo de incubación, 6. Larva en el suelo en el periodo de incubación. Fuente: De Campos Pereira *et al.* 2008.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Esta especie es originaria de Asia, fue introducida al Neotrópico mediante la importación de ganado, se encuentra ampliamente distribuida desde el Norte de Argentina (De Campos Pereira y Lambruna 2008, Estrada – Peña *et al.* 2005). De acuerdo a Cortés *et al.* (2010), el primer registro oficial de *R (B) microplus* para Colombia fue realizado en 1939 por Osorno, con base en la revisión de trabajos de literatura gris previamente realizados por Dunn (1923) donde registra observaciones en Bucaramanga y Barranquilla, y por Minning (1934) con registros en Cartagena; además de estos sitios se ha registrado la especie para Caldas, Antioquia, Meta, Sucre, Magdalena, La Guajira, Córdoba, Boyacá, Huila, Cauca y Nariño, en altitudes entre los 2 y los 2000 msnm (Hernández *et al.* 1977 en Cortés *et al.* 2010, CORPOICA 2008, 2011).

Recientemente se registró *R (B) microplus* para el Altiplano Cundiboyacense (CORPOICA 2008, 2012, Cortés *et al.* 2010), lo que llama atención ya que se presenta introducción en una región diferente a la que normalmente se ha observado en el país, no solamente latitudinalmente sino altitudinalmente, puesto que se ha observado en altitudes entre los 2000 a 2800msnm (Betancourt, com pers, Observación personal); en la región se presenta ganadería de leche principalmente especializada que está basada especialmente en animales de la raza Holstein la cual se ha asentado en los altiplanos y se ha visto afectada por introducciones accidentales de garrapatas debido a movilización de animales desde otras regiones en fincas aledañas a la Sabana de Bogotá (CORPOICA 2008).

El establecimiento de esta garrapata en nuevas regiones de Colombia es preocupante puesto que podría presentarse una posible transmisión de hemoparásitos dañinos para su hospedero (ganado bovino) y que, debido al desconocimiento local de esta especie, llevaría a un manejo improvisado, con tratamientos químicos más frecuentes de lo normal (Ortiz 2004), afectando tanto al ganado y su producción, como el ambiente natural inmediato a la finca.

1.4.3. Teoría de Nicho

La teoría de nicho empezó a ser planteada por diversos autores desde inicios del siglo pasado, sin embargo, son tres etapas las más reconocidas en el proceso de conceptualización, la cuales han involucrado los componentes en los cuales se fundamenta el concepto de nicho ecológico actualmente. En un contexto cotidiano el nicho es definido como: *“concavidad en el espesor de un muro, para colocar en ella una estatua, un jarrón u otra cosa, o, concavidad formada para colocar algo; como las construcciones de los cementerios para colocar los cadáveres”* RAE. Para el contexto científico, el término fue utilizado por primera vez a inicios del siglo XX por Joseph Grinnell y Elton, ellos consideraban el nicho como un concepto cualitativo difícil de poner en práctica, posteriormente llega una teoría unificadora propuesta por Hutchinson hacia 1957, ya que, incluyó preceptos tanto de Grinnell como de Elton, e integró un componente cuantitativo de tal manera que el concepto de nicho pudiera ser medible o aplicable en la ecología, siendo este, el concepto más acogido dentro de las ciencias biológicas actualmente.

Concepto de Nicho según Grinnell

Entre 1914 a 1924 el biogeógrafo y zoólogo Joseph Grinnell expuso en sus diferentes publicaciones¹ la importancia de la relación de las variables ambientales tanto bióticas como abióticas en distribución geográfica de las especies, en un principio, utilizó la palabra nicho sin darle un claro fundamento y significado, sin embargo, lo planteó en un contexto ambiental y definido espacialmente, por lo que muchos autores deducen que la propuesta de Grinnell estaba más enfocada al hábitat. Schoener (1989) hace una revisión sobre el nicho ecológico y plantea que el concepto de nicho de Grinnell toma en cuenta: que el nicho, encierra dimensiones alimenticias y espaciales, provee una explicación de la relación de una especie a un tipo de vegetación, que existen nichos vacíos en una comunidad y son fácilmente identificables desde sus ocupantes, mantiene el principio de exclusión competitiva, finalmente expone y plantea que la última unidad de asociación ocupada por una única especie es su nicho ecológico, asumiendo que un nicho no puede ser ocupado por dos especies y la espacialización del mismo.

¹ An account of the mammals and birds of the Lower Colorado Valley, with especial reference to the distributional problems presented (1914); The niche-relationships of the California Thrasher (1917); Geography and evolution (1924)

Concepto de nicho de Elton

Hacia 1927, Elton publica el libro *Animal ecology*, en el cual plantea el concepto de nicho, el precepto general de este autor es que el nicho puede ser definido por una larga extensión de terreno, su tamaño y sus hábitos alimenticios, donde el concepto no es restringido a una sola especie. Por otro lado, Elton, no limita la discusión al alimento, ya que algunas veces incluye otros factores cuando describe el nicho de un animal, ya que plantea el lugar del animal en su comunidad, su relación con el alimento y sus enemigos con otros factores (Schoener 1989). A diferencia de Grinnell Elton no toma en cuenta condiciones de macrohábitat (asociaciones, de vegetación). En resumen, Elton plantea el nicho desde el principio de redes tróficas y ciclos tróficos (Schoener 1989, Díaz 2006).

Concepto de nicho según Hutchinson

De acuerdo a Díaz (2006), la teoría de nicho propuesta por Hutchinson es una propuesta unificadora ya que involucra elementos tanto de Grinnell como de Elton, además de incluir la cuantificación del mismo.

La definición propuesta por Hutchinson, determina un hipervolumen de recursos n – *dimensional* en el que vive una especie, donde el nicho puede ser descrito cuantitativamente en un plano por coordenadas, lo que define como un espacio abstracto. Hutchinson 1957, “considera dos variables ambientales independientes x_1 y x_2 , las cuales pueden ser medidas a lo largo de coordenadas rectangulares ordinarias. Deja los valores limitantes permitiendo a una especie S_1 sobrevivir y reproducirse son respectivamente x'_1 , x''_1 para x_1 y x'_2 , x''_2 para x_2 . Un área se define así, cada punto del cual corresponde a un posible estado ambiental permitiendo existir indefinidamente a la especie. Si las variables son independientes y su acción sobre las especies, podemos considerar esta área como el rectángulo ($X_1 = x'_1$, $x_1 = x''_1$, $X_2 = x'_2$, $x_2 = x''_2$, pero si falla tal independencia del área existirá cualesquiera la forma de sus bordes (Figura 3).

Se puede ahora introducir otra variable x_3 y obtener un volumen, y luego más variables x_4, \dots, x_n hasta todos los factores ecológicos relativos a S_1 han sido considerados. De esta forma un hipervolumen n -dimensional es definido, cada punto en el cual corresponde a un estado ambiental el cual debería permitir a la especie S_1 existir indefinidamente. Para cualquier

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

especie S_1 , este hipervolumen N_1 será llamado el *nicho fundamental* de S_1 . Similarmente para una segunda especie S_2 el nicho fundamental será similarmente definido como hipervolumen N_2 . Será aparente que, si este procedimiento pudiera ser llevado a cabo, todas variables X_n tanto físicas como bióticas, son consideradas, el nicho fundamental de cualquier especie definirá completamente sus propiedades ecológicas. El nicho fundamental definido de esta forma es meramente una formalización abstracta de lo que usualmente se entiende como nicho ecológico”.

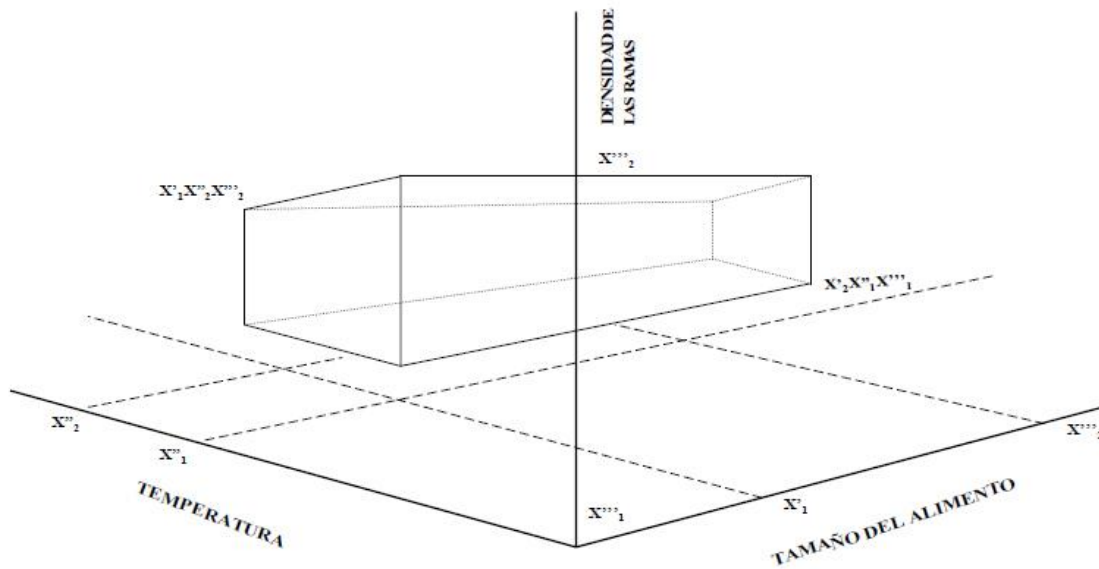


Figura 3. Nicho fundamental tridimensional ortogonal. Un nicho fundamental tridimensional ortogonal; x' puede definir el tamaño del alimento, en este caso el diámetro medio de varias semillas o frutos, en especial bellotas; x'' puede definir la tolerancia a la temperatura, y x''' alguna medida de la densidad de ramas, entre determinados diámetros, por unidad de volumen de espacio físico. Por lo tanto, el eje x' es un eje bionómico, el eje x'' es escenopoético, mientras que el *status* del x''' no es intuitivamente evidente, aunque resulta claramente significativo (Hutchinson, 1978).

Plantea Hutchinson que, si se introduce una segunda especie, su nicho como ha sido definido, no puede superponerse a la primera especie. Si, sin embargo, se superponen es de esperar que en la parte del hiperespacio donde hay solapamiento, la exclusión competitiva se llevará a cabo y la región superpuesta se incorporaría en el nicho de una u

otra especie, o se dividirá entre las dos, produciendo los nichos efectivos o postinteractivos ('realized niche') de las dos especies (Figura 4).

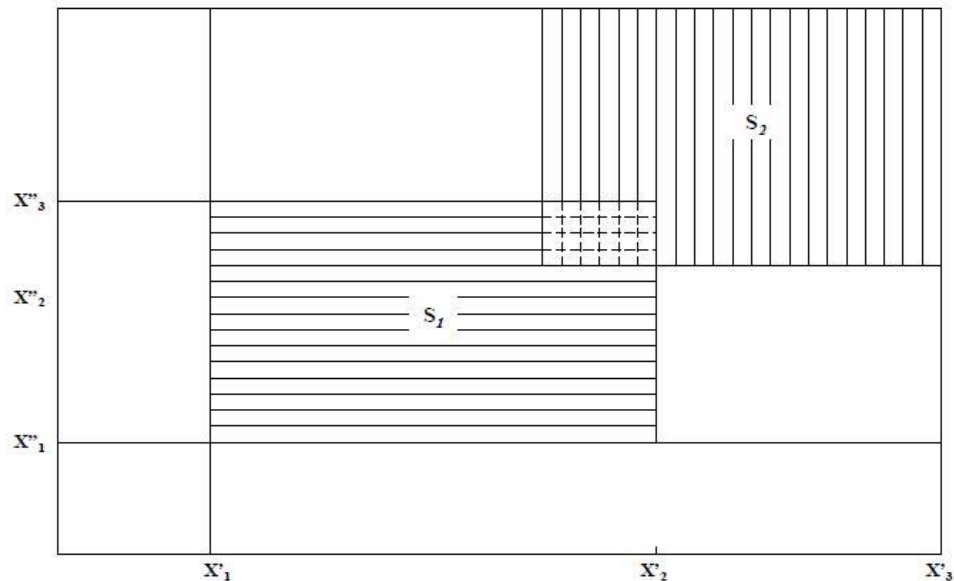


Figura 4. Dos nichos fundamentales bidimensionales ortogonales que se superponen en la intersección tiene lugar exclusión competitiva: una especie o la otra resultan eliminadas, o bien ambas se reparten el espacio del nicho, lo que produce sendos nichos efectivos (Hutchinson, 1978).

A diferencia de Grinnell y Elton, para Hutchinson no existen nichos vacíos si no espacio ecológico vacío, donde el nicho no es una propiedad del ambiente si no de los organismos. Por lo tanto, puede haber partes del hipervolumen en el espacio ecológico, que no esté ocupado por el nicho de una especie y está disponible para ser ocupado por el nicho de una especie sin que haya competencia.

La teoría de nicho se ha convertido en un eje conductor de diferentes disciplinas como, la ecología, la evolución, la biogeografía, la biología de la conservación, que aporta a dar respuesta sobre el establecimiento de una especie en un espacio ecológico de un espacio geográfico dado. A pesar de que los tres planteamientos intentan abarcar todos los elementos que podrían definir la presencia de una especie en un lugar dado, no lo logran, pero si aportan con importantes elementos que pueden ser unificadores en las diversas

disciplinas que buscan respuestas a preguntas a la distribución y presencia de las especies en sus ambientes y las respuestas de estas frente a los cambios que se están presentado actualmente con las actividades humanas.

1.4.4. Análisis de Sistemas

Se puede definir el sistema como como un conjunto de componentes interrelacionados que poseen un límite y funcionan como una unidad, mediante un conjunto de procesos interconectados que se caracteriza por vías reciprocas de causa efecto (Grant *et al.* 2001).

Los sistemas tienen dos propiedades principales, la primera de ellas es una característica de anidamiento, es decir que un individuo es parte de una población, una población de una comunidad etc.; la segunda propiedad se relaciona con la escala, donde sistemas con la misma escala y el mismo nivel de detalle se pueden sobreponer, como por ejemplo dinámicas de población parásito-hospedero, donde la población **A** se cruza con la población **B**. El análisis de los sistemas se fundamenta en la aplicación del método científico a cuestiones relacionadas con sistemas complejos, por medio de teorías, técnicas que permiten describir y hacer predicciones acerca de estos, haciendo uso de matemática avanzada, procedimientos estadísticos y computadoras. No obstante, el fundamento de este análisis radica en la universalidad y la flexibilidad de su enfoque, más que en el conjunto de técnicas cuantitativas que se implementen (Grant *et al.* 2001).

Modelos de sistemas biológicos

De manera general, los modelos se utilizan para registrar o predecir respuestas ante diferentes situaciones en un espacio y momento dados. Con respecto a organismos, Morrison *et al.* (1992), Plantean que hay dos tipos de predicciones que se pueden derivar de los modelos: la primera, describir los patrones observados mediante la presencia o abundancia de una especie en el tiempo y en el espacio en el momento en el que se tomaron los datos originalmente (estado actual); y la segunda, la respuesta de la especie en condiciones de espacio y tiempo no representadas por los datos usados para generar el modelo (estado anterior, futuro o una nueva región).

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Por su parte, Levins (1966) plantea que existen tres propiedades para los modelos, Precisión, Realidad y Generalidad, donde solamente dos de estas pueden ser mejoradas al plantearse en un modelo, sacrificando la tercera; de allí se pueden derivar tres tipos generales de modelos (Figura 5).

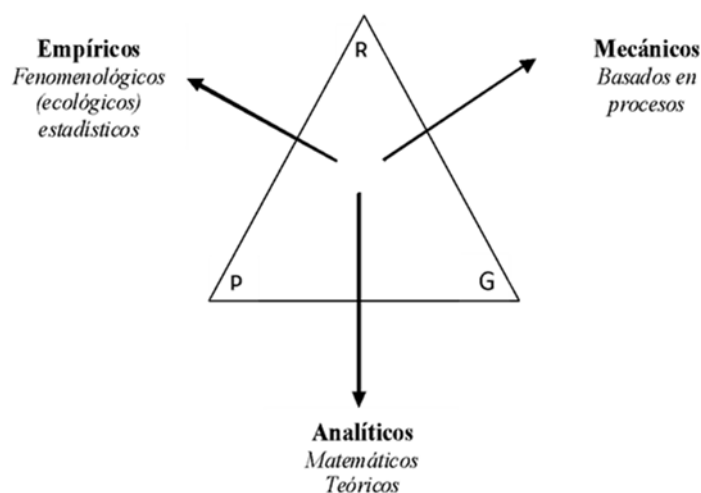


Figura 5. Tipos de Modelos planteados por Levins 1966. R: realidad; P: precisión; G: generalidad. Tomada de Guisan y Zimmermann 2000.

Los modelos **Empíricos**, basados en los principios de Precisión y Realidad, denominados también como fenomenológicos o estadísticos, no pretenden sustentar funciones de los sistemas modelados, son del tipo estadístico donde su principal fin es describir hechos empíricos (Wissel 1992, Hannon y Ruth 1997, Guisan y Zimmermann 2000).

Los modelos **Mecánicos**, se basan en la Realidad y Generalidad, se denominan fisiológicos o de procesos, y basan sus predicciones en la relación causa efecto en un sistema dado; en lugar de realizar predicciones de precisión, realiza correcciones teóricas de la respuesta esperada (Pickett *et al.* 1994, Hannon y Ruth 1997, Guisan y Zimmermann 2000).

Los modelos **Analíticos**, mantienen los principios de Precisión y Generalidad, denominados analíticos o matemáticos, y están diseñados para predecir con exactitud la respuesta de un sistema frente a un evento en una realidad limitada y simplificada (Guisan y Zimmermann 2000).

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

El planteamiento de este proyecto tendrá como fin integrar modelos de distribución de especies basados en nicho ecológico, que son modelos empíricos de tipo estático y modelos mecánicos de tipo dinámicos basados en procesos (Guisan y Zimmermann 2000), para integrar la dinámica de la población de una especie de garrapata en un sistema ganadero del Altiplano Cundiboyacense, enmarcándose en los principios de realidad y precisión de Levins (1966).

Modelos estáticos y Modelos dinámicos

Los modelos estáticos representan un fenómeno particular en un punto y tiempo dado, es el caso de un mapa de localización de una enfermedad para un año específico, pero no permite evidenciar la evolución de la misma, puesto que se basa en un punto fijo (Hannon y Ruth 1997, Grant *et al.* 2001).

Los modelos dinámicos permiten describir el cambio y evolución de un sistema en el tiempo mediante la representación de procesos, lo cual se logra por medio del desarrollo de modelos matemáticos, intentando capturar el cambio en tiempo real o simulado (Hannon y Ruth 1997, Grant *et al.* 2001).

Los modelos dinámicos de sistemas ecológicos son diseñados para comprender y conocer los cambios que se presentan en los patrones de cambio de estos sistemas definidos como, *crecimiento*, *caída* y *oscilación*. Para lo cual se generan simulaciones de procesos dinámicos que intentan capturar los cambios a través del tiempo; como el caso de un modelo dinámico para explicar el comportamiento de oscilación de poblaciones de predadores a través del tiempo (Ford 1999, Turner *et al.* 2001, Hannon y Ruth 1997).

Diseñar un modelo dinámico estructurado y riguroso depende de la identificación del problema dinámico a ser estudiado, para así tener claro el contexto en el que se graficará la variable que cambiará sobre el tiempo, y que será reconocida como un resumen del problema, a esta gráfica se le denomina *modo de referencia* (Figura 6), la cual ayudará a dar una pauta para definir el patrón o los patrones de cambio del sistema en los que se

enfocará el estudio. Al tener definido el problema dinámico se debe pensar en las variables claves del sistema y sus interacciones, donde en el modelo las variables importantes del sistema serán representadas como tal y las conexiones de causa – efecto serán representadas por interconexiones (Ford 1999).

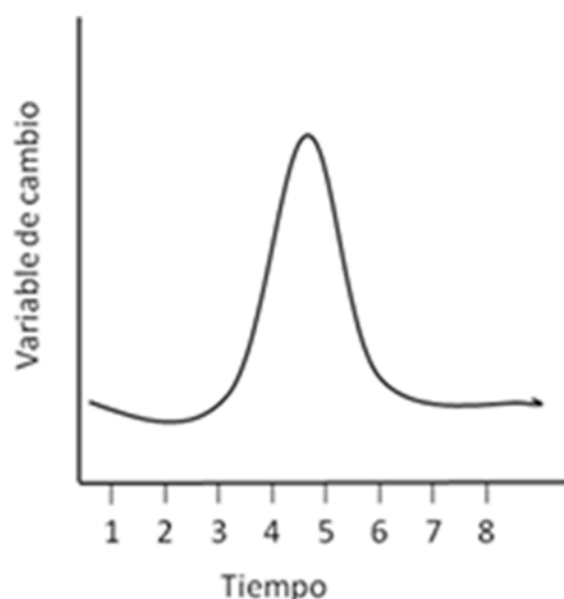


Figura 6. Esquema general del modo de referencia para una población.

La construcción de un modelo dinámico inicia con la consolidación del diagrama de estado y flujo (Figura 7a), que debe contener la variable de cambio establecida en el *modo de referencia*; y se debe esquematizar el diagrama de ciclos causales (Figura 7b), los cuales describen y traducen relaciones positivas o negativas de causa – efecto planteadas en el diagrama de flujo. Posteriormente se estiman los parámetros (valores de las variables) del modelo, los cuales provienen de la información disponible de diversas fuentes como, datos de campo, bases de datos o, especialistas del sistema a modelar. A partir de los pasos anteriores se realiza un primer modelo, al que se le debe aplicar un análisis de sensibilidad con el fin de observar si los resultados del patrón básico del sistema son sensibles a parámetros inciertos e identificar un rango de incertidumbre en el que variarían los parámetros, y finalmente se debe probar el impacto de manejo del sistema (Ford 1999).

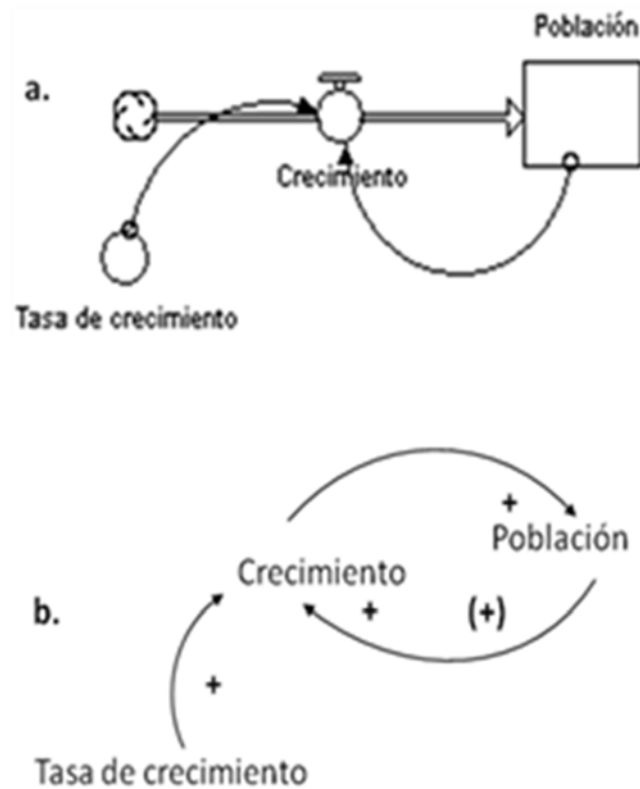


Figura 7. Modelo básico de una población. a. Diagrama de flujo; b. ciclo causal.

Modelo estático: modelos de distribución de especies (MDS)

Los modelos de distribución de especies son métodos que relacionan las características ecológicas de registros de presencia y en algunos casos ausencia, con el fin predecir la probabilidad de presencia o ausencia de una especie a través de un paisaje (Figura 8), apoyándose en Sistemas de Información Geográfica (Graham *et al.* 2004, Soberón y Peterson 2005, Pearman *et al.* 2008).

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

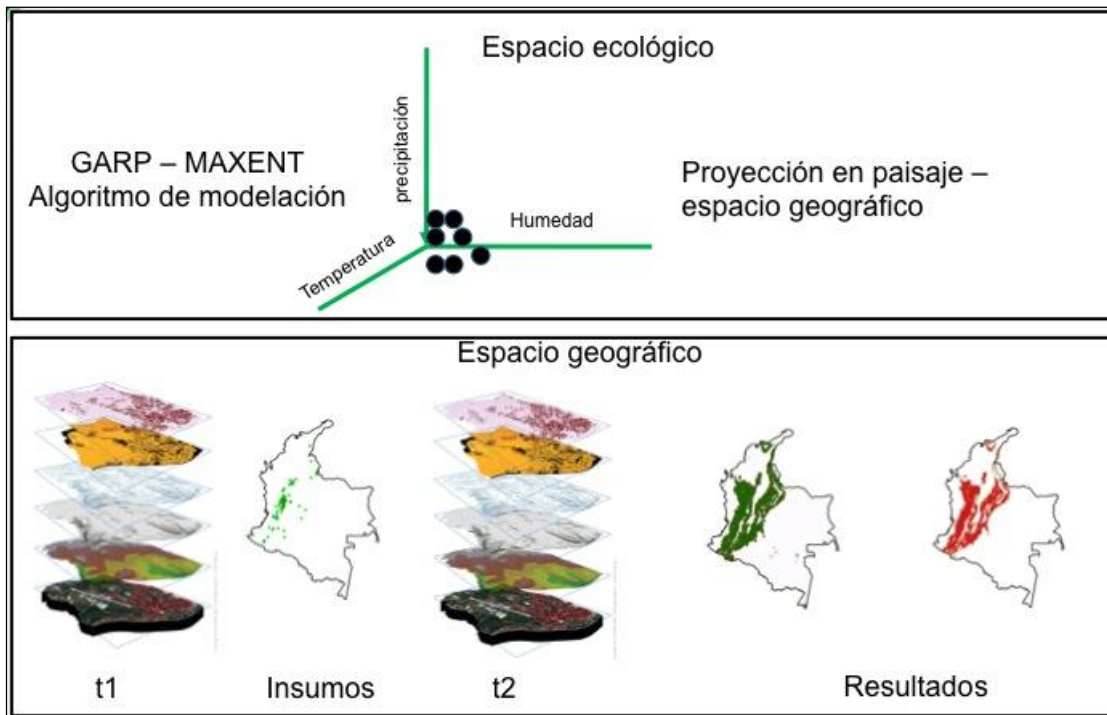


Figura 8. Procedimiento de los modelos de distribución de especies (MDS). Adaptado de Martínez - Meyer, 2009.

Los MDS tienen como fundamento la teoría de nicho de Hutchinson (1978), donde plantea que en un hipervolumen hay n dimensiones que establecen las condiciones para que una especie se establezca, y que a su vez depende de factores tales como la capacidad de colonización de la especie, lo cual le permitirá ubicar el lugar que presenta su nicho; así mismo consideran el principio exclusión competitiva planteado por Hutchinson (1978) a partir de lo propuesto por Gause (1934), donde la presencia de la especie puede estar determinada por la presencia de otras especies que compiten por los mismos recursos o que la usan como presas. Estas premisas llevan a plantear dos clases de nicho: 1) el nicho fundamental, definido como el hipervolumen donde la especie puede establecerse sin enemigos o ninguna clase de competencia, y 2) el nicho efectivo (realized) el cual se define como el nicho realmente utilizado por la especie en condiciones de competencia y otros factores limitantes (Hutchinson 1978, Schoener, 1989, Begon *et al.* 2006) (Figura 9).

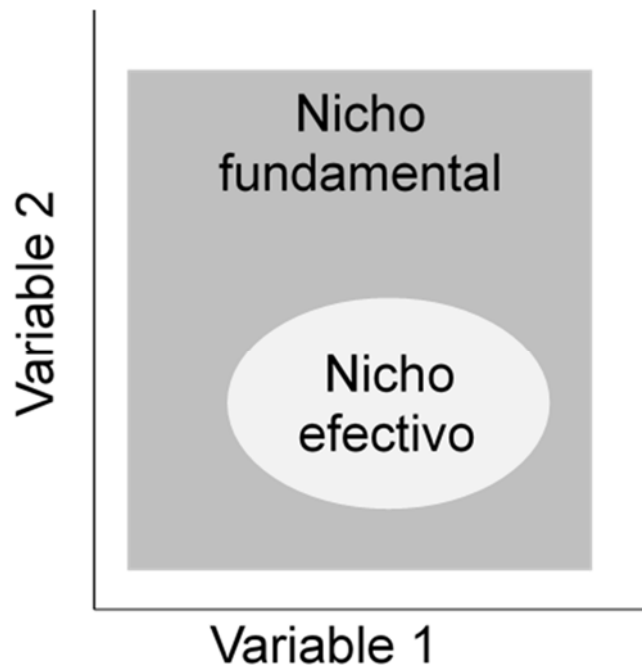


Figura 9. Nicho fundamental y nicho efectivo en dos dimensiones, tomado de Hutchinson, 1978.

El modelado de Nicho ecológico genera tres tipo de predicciones (Figura 10), la primera, es una interpolación espacial de la información ambiental conocida “llenado de vacíos”, alrededor de las localidades de ocurrencia conocidas, proporcionando una mejor estimación de la región geográfica ocupada, que probablemente es más informativo que un polígono convexo mínimo basado en coordenadas, o que otras aproximaciones espaciales que no toman en cuenta la variación ambiental subyacente (número 1, en Figura 10), por otro lado, sí la áreas predichas están lejanas de las ocurrencias conocidas por barreras de dispersión, son removidas (Peterson *et al.* 2002), por lo tanto, las predicciones del modelo proveen un mejoramiento adicional a la estimación del espacio geográfico inicial, este tipo de predicción se puede aplicar en la planificación de conservación (Peterson *et al.* 2011).

El segundo tipo de predicción se relaciona con la transferencia espacial, que se refiere a identificar las partes del área ocupada (Figura 10, círculos grises), o, al área abiótica adecuada (Figura 10, círculos sin relleno), para la cual no han sido colectados registros de ocurrencia. A pesar de que el modelo no predice áreas de distribución ocupadas que tiene condiciones ambientales no representadas entre los registros de ocurrencia (etiqueta 2,

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Figura 10) este tipo de predicción, puede ser usada como guía para evaluaciones en campo, enfocado hacia la búsqueda de áreas con alta probabilidad de nuevas ocurrencias de especies.

El tercer tipo de predicción, está relacionado con estimar la porción del área bióticamente adecuada, que es ambientalmente similar a sitios donde se sabe que la especie se establece, pero que no necesariamente se encuentra habitada (etiqueta 3, Figura 10). Esta, es el área de distribución que puede ser invadida. Este tipo de predicción es el que le interesa a este trabajo, ya que puede ser utilizada para identificar áreas en los que una especie puede convertirse en invasoras si supera las barreras de dispersión y las posibles barreras bióticas.

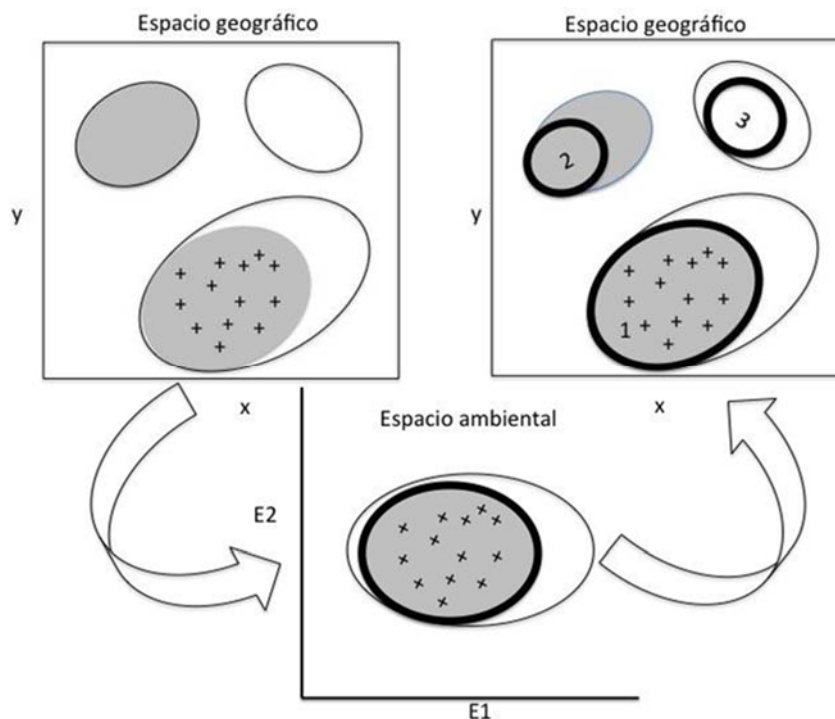


Figura 10. Ejemplo del proceso de modelización de nichos ecológicos a partir de presencias observadas, + Registros de ocurrencias de la especie conocidas. Ejemplo del proceso de modelización de nichos ecológicos a partir de presencias observadas, + Registros de ocurrencias de la especie conocidas, elipses sombreados en gris área de distribución ocupada, elipses sin color y sin remarcar áreas abióticamente adecuadas, refiriéndose a nicho fundamental, las elipses remarcadas representan el modelo ecológico de nicho

ajustado a los registros de presencia conocidos. Etiquetas 1 hacia 3 se refiere a los diferentes tipos de predicciones generadas por el modelo (adaptado de Pearson (2007) y Peterson *et al.* 2011).

Modelos de distribución y especies introducidas

De acuerdo a Peterson *et al.* (2011), la invasión de especies es un campo interesante que ofrece una gama de opciones interesantes para explorar procesos que subyacen a la ecología geográfica. Tanto en las ciencias aplicadas como en las teóricas – conceptuales, la pregunta de las invasiones deriva en lo mismo, ¿en qué grado puede ser anticipado el curso geográfico de las invasiones basados en variables escenopoéticas² e interacciones bióticas? (Peterson *et al.* 2011), lo cual no se resuelve completamente, pero se hacen esfuerzos para obtener respuestas acertadas.

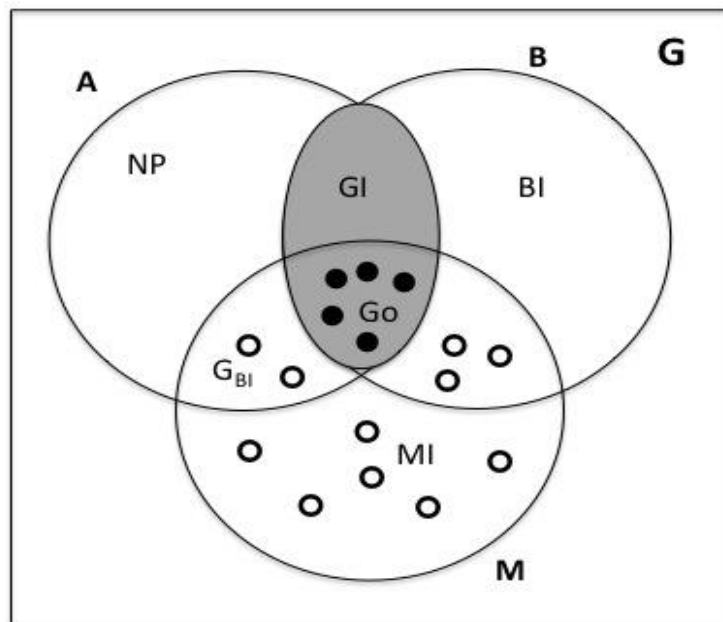


Figura 11. Diagrama BAM. G, área geográfica dada. A, Abiótico, B. Biótico, M, factores de movimiento y dispersión. Adaptado de: Soberón y Peterson (2005), Jiménez-Valverde (2011) y Peterson *et al.* 2011.

² Se refiere a variables ecológicas que no interactúan con otras y que cambian lentamente, como la altitud, la cobertura vegetal, clima.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

De acuerdo a Peterson *et al.* (2011), en el marco de la modelización de nicho para especies invasoras es importante incluir el papel de las interacciones bióticas en la conformación de las distribuciones de especies. Soberón y Peterson (2005), plantearon un diagrama explicativo denominado BAM (Figura 11), el cual identifica la dinámica de la influencia entre las condiciones ambientales, las bióticas y la dispersión en la conformación de la distribución geográfica de las especies, este diagrama contiene tres componentes principales dentro de una región G, el componente A, que se refiere al área geográfica que cumple con las condiciones abióticas dentro del nicho en un tiempo dado, y donde la tasa de crecimiento de la especie debería ser positiva es decir el área de distribución potencial (Jiménez - Valverde *et al.* 2011), son áreas que corresponden a que cumplen con requerimientos fisiológicos de la especie, es decir un Nicho Potencial (NP) de acuerdo a Jackson y Overpeck (2000) en Jiménez - Valverde *et al.* 2011, donde $NP = NF \cap E$, NF es el nicho fundamental de la especie y E representa las condiciones ambientales existentes en una región. El componente B representa es el área geográfica donde las interacciones bióticas son favorables para la presencia y existencia de las especies. El componente M es el área que queda accesible a las especies, referida a factores de movimiento y es la que se relaciona con la invasión de especies. Al observar el Diagrama de BAM (Figura 11), el nicho efectivo está definido por la intersección entre A, B y M. GI, es el área geográfica con condiciones bióticas y ambientales abióticas que permanece sin colonizar y potencial para ser invadida, existe la zona GBI es el área disponible y que presenta condiciones ambientales favorables pero con condiciones bióticas desfavorables, aunque podría ser un área potencial de invasión si la especie tiene una respuesta plástica con respecto a las variables bióticas o si alguna especie asociada ya ha se ha introducido o invadido (Jiménez-Valverde *et al.* 2011). NP es un área con barreras geográficas que la hacen inaccesible con condiciones abióticas adecuadas, pero con condiciones bióticas inadecuadas. MI y BI son áreas abióticamente inadecuadas pero accesible o bióticamente adecuadas respectivamente. Esta dinámica de interacciones juega un papel importante, en la dispersión el establecimiento, éxito o fracaso del establecimiento de una especie, y su éxito dependerá de la plasticidad de respuesta de las especies, característica que determina las especies invasoras, así como las especies denominadas plagas.

1.4.5. MODELACIÓN DINÁMICA

El marco de referencia del planteamiento dinámico de esta propuesta corresponde a, sistemas dinámicos y modelos basados en agentes e individuos (MBAI), que se explican a continuación.

Sistemas dinámicos

Se fundamentan en el concepto de *Pensamiento Sistémico*, definido como la capacidad de ver el mundo como un sistema complejo, en el que se entiende: que “: cada actor de un sistema no puede hacer “una sola cosa” y que “todo está conectado entre sí”. Esta modelación es interdisciplinaria, basada en la teoría de dinámicas no lineales y el control de la retroalimentación desarrollado en matemáticas, física e ingeniería, aplicándola a comportamientos humanos, físicos, ecológicos y sistemas técnicos, a partir de la psicología cognitiva, social, economía y otras ciencias sociales, intentando dar solución a temas del mundo real (Sterman 2000).

Los sistemas dinámicos (SD) planteados en este estudio, se encuentran dentro de la clasificación de dinámica aplicada y experimental, ya que se basan en una formulación de ecuaciones diferenciales ordinarias (ODEs), que representan la dinámica mediante la retroalimentación entrelazando bucles que proporcionan información sobre el comportamiento esperados de un sistema. La representación de los SD, se lleva a cabo utilizando dos componentes simples generales: los stocks y los flujos (Figura Introductorio - 7a). Donde los parámetros internos (stocks o variables de estado), siguen reglas temporales y comportamentales, y varían en el tiempo, (Forrester 1961, Ford 1999, Vincenot *et al.* 2011).

Los modelos enmarcados en esta categoría, a pesar de generar resultados importantes, presentan algunas limitaciones, como la representación espacial, lo cual se dificulta realizar mediante los stocks y flujos, las soluciones son matemáticas, y el sistema se modela como un único producto, mediante las variables de estado que representan valores promedio. Estas limitaciones pueden superarse complementando o combinando este tipo de modelos con otros enfoques (Vincenot *et al.* 2011).

Modelos basados en agentes e individuos (MBAI)

Los MBAI son modelos que representan de manera individual y discreta los componentes del sistema y su comportamiento, de hecho, los individuos o agentes son descritos como únicos y entidades autónomas que usualmente interactúan entre ellos, unas con otras y con sus ambientes locales, lo cual permite simular poblaciones o comunidades, donde los agentes pueden ser organismos, humanos, negocios, instituciones (Railsback y Grimm 2011).

La autonomía implica que cada agente actúe independientemente uno del otro y cumpla sus propios objetivos; de otra parte, los agentes usan un *comportamiento adaptativo*, es decir que ajustan su comportamiento al estado actual de ellos mismos, o de otros agentes y de su ambiente dentro del proceso de modelamiento (Givonart *et al.* 2012, Railsback y Grimm 2012). Con los MBI se puede evaluar cómo surge el comportamiento de un sistema, a partir de las relaciones, las características y comportamientos individuales de los componentes (Railsback y Grimm 2012).

A diferencia de las técnicas tradicionales de modelamiento, esta técnica incluye las características propias de los individuos que los hace únicos como, sexo, edad, tamaño, descendencia, estados de desarrollo o ciclos de reproducción; además de reglas comportamentales como el movimiento, búsqueda de recursos, e historia, interactuando localmente lo que significa que los agentes usualmente no interactúan con todos los agentes del sistema, pero si con sus vecinos en un espacio geográfico, o en otro espacio como una red de trabajo.

Un componente interesante y talvez el más innovador de esta técnica, es la inclusión del espacio en un tipo de modelamiento continuo, que pasa por ecuaciones en derivadas parciales, lo que limita el número de opciones relativas a movimientos individuales y que pueden interactuar en espacios multidimensionales (Railsback y Grimm 2011, Vincenot *et al.* 2012, Givonart *et al.* 2012, De Angelis y Grimm 2014).

PROTOCOLO ODD

Debido a que es una técnica relativamente nueva, maneja sistemas complejos y la descripción era prácticamente verbal, la comunicación de los resultados de los MBI no es sencilla (Grimm *et al.* 2010, Railsback y Grimm 2011), por lo que debido al incremento de estudios que utilizan esta técnica, se desarrolló un protocolo estandarizado que permitiera presentar de manera sistemática los pasos, componentes y resultado de los MBI. Por sus siglas en ingles el Protocolo ODD se refiere a Overview, Design concepts and Details, donde cada uno de estas categorías contiene sus propios elementos los cuales se describirán más adelante (Tabla 1). Con este protocolo se pretende guiar hacia una descripción completa de modelos realizados con el enfoque MBI, de tal manera que puedan ser replicables en todos los niveles de investigación, desde el neófito hasta el científico más experto.

Tabla 1. Categorías y elementos del protocolo ODD (Grimm *et al.* 2010, Railsback y Grimm 2011).

Categorías	Elementos
Overview (Resumen)	Propósito
	Variables de estado y escala
	Procesos generales y programación
Design concepts (Conceptos de diseño)	Principios básicos
	Emergencia
	Adaptación
	Objetivos
	Aprendizaje
	Predicción
	Detección
	Interacción
	Estocasticidad
	Colectivos
Details (Detalles)	Observación
	Inicialización
	Insumos
	Submodelos

Resumen

Propósito

Se refiere a la finalidad del modelo, cada modelo debe iniciar con una pregunta clara, problema o hipótesis. No se presenta ningún detalle, solamente un resumen general del modelo, el cual es independiente del propósito del estudio de investigación (Grimm *et al.* 2010). Debe ser una frase clara y concisa, una pregunta o un problema que conduzca a saber cuál es el sistema que se está modelando y que se está tratando de aprender sobre él (Railsback y Grimm 2011).

Variables de estado, entidades y escalas

Las entidades representan la clase de objetos o elementos presentes en el modelo, los cuales son únicos, se comportan como una unidad y pueden interactuar entre ellos o de manera independiente y con su ambiente global. Las entidades son caracterizadas por las variables de estado, las cuales especifican el estado de la entidad en cualquier momento del modelo, el cual está definido por sus propiedades o atributos como, tamaño, edad, forma, estado de desarrollo, o también pueden ser definidas por su estrategia comportamental, búsqueda de pareja, búsqueda de hospedero, algoritmos de aprendizaje. Cabe resaltar, que algunas variables de estado son estáticas, como el sexo o la especie, pero al ser propias del agente se incluyen, a menos que sea una sola especie o solo hembras o solo machos (Railsback y Grimm 2011).

En su gran mayoría, los MBI, son modelos espacialmente explícitos y es en este momento donde se plantean las escalas, las cuales son espaciales y temporales. La escala temporal define la extensión del tiempo de simulación que a su vez contiene variaciones durante la simulación, que están definidas por intervalos de tiempo que están dados por las propiedades de las entidades, como las tasas de mortalidad o tasas de mortalidad, o tiempos de búsqueda de hospederos, presas o alimentos etc. La escala espacial, se representa mediante a una grilla que contiene celdas o parches, que permiten describir el tamaño total del espacio (extensión) y la resolución (tamaño de la celda) y la variación de cada celda en el espacio, lo cual se asocia a la configuración del paisaje. La resolución espacial y temporal, dependerá del comportamiento clave, las interacciones y los

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

fenómenos, las relaciones espaciales y efectos dentro de cada parche son ignorados, solamente efectos entre celdas son representados (Railsback y Grimm 2011).

Procesos generales y programación

Los procesos generales: se refieren a los procesos que cambian las variables de estado de las entidades del modelo, describe cada procedimiento, comportamiento o dinámica de las entidades. Se presenta un resumen donde se debe hacer una descripción sucinta de cada proceso ejecutado en el modelo, reseñando lo que hacen las entidades en un momento dado y durante toda la simulación, así como cuáles son las actualizaciones y cambios que ocurren en su ambiente. La descripción se referirá a un nombre que explique por si solo el comportamiento, como apareamiento, mortalidad, sobrevivencia, etc. La programación, hace referencia al orden en el que los procesos son ejecutados por el computador, provee un esbozo sucinto del modelo completo, esto puede realizarse mediante un listado de los procesos del modelo, en el orden en el que son ejecutados, adicionando cual detalle necesario al orden en el cual los agentes individuales se ejecutan (Railsback y Grimm 2011).

Conceptos de Diseño

Describen como se implementa el modelo mediante un conjunto de conceptos básicos, que son importantes para diseñar los MBI. Mediante estos conceptos se proporciona una forma estandarizada de presentar y pensar en características importantes de los MBI que no pueden ser bien descritas usando otros enfoques como las ecuaciones diferenciales. Son 11 conceptos del diseño (Tabla xx), pero no necesariamente todos deben incluirse en un modelo, ya que, dependiendo de complejidad o simplicidad del modelo, se utilizarán unas y otras no (Grimm *et al.* 2006, Grimm *et al.* 2010, Railsback y Grimm 2011).

Principios básicos. Cuáles son los conceptos generales, teorías, hipótesis, o enfoques fundamentan el diseño del modelo. ¿Cómo se relaciona el modelo a pensamientos previos sobre el problema estudiado?; ¿Cómo fueron incorporados estos principios al diseño del modelo?

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Salida. Tipo de resultados del modelo, ¿cuáles de ellos emergen de representaciones mecánísticas, del comportamiento adaptativo de los individuos y cuales son impuestos por reglas que fuerzan al modelo a producir ciertos resultados?

Adaptación. ¿Qué rasgos de adaptación tienen los individuos? ¿Qué reglas tienen para la toma de decisiones o el cambio de comportamiento en respuesta a los cambios en sí mismos o su ambiente? Estos rasgos buscan explícitamente aumentar cierto grado de éxito individual con respecto a sus objetivos (por ejemplo, "mover a la celda que proporciona la tasa de crecimiento más rápido", donde se supone que el crecimiento sea un indicador de éxito.

Objetivos. Si rasgos explícitamente adaptativos actúan para incrementar el éxito individual, ¿Cuál es exactamente ese objetivo y cómo se mide? En qué momento toman decisiones los individuos clasificando alternativas, ¿qué criterios utilizan?

Aprendizaje. ¿Muchos individuos o agentes cambian sus rasgos de adaptación en el tiempo como consecuencia de su experiencia? ¿Si es así, cómo?

Predicción. Es fundamental para una toma de decisión acertada, si los rasgos adaptativos de un agente o procedimientos de aprendizaje se basa en la estimación de futuras consecuencias de las decisiones, ¿cómo hacen los agentes para predecir las condiciones futuras, tanto propias como ambientales que ellos experimentarían?

Detección: ¿Cuáles variables internas de estado y del ambiente, son agentes que asumen para detectar y además considerar en sus decisiones? ¿Son los mecanismos mediante el cual los agentes obtienen información explícitamente modelada, o son individuos simplemente que conocen aquellas variables?

Interacción. ¿Cómo interactúan los agentes del modelo?, interactúan directamente con cada uno de los otros (un agente cambia directamente el estado de los otros) o es una interacción mediada, tal como la competencia por un recurso. Con cuales otros agentes interactúan. ¿Qué mecanismos de verdadera interacción fueron la representación del modelo de interacción basado en?, ¿A qué escalas espaciales y temporales ocurren?

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Estocasticidad. ¿Cómo son los procesos estocásticos (basados en la pseudo-aleatorización) usados en el modelo y por qué? ¿Son estocásticos los procesos usados para inicializar el modelo? ¿Debido a que se cree importante para algunos procesos a ser variable, pero carece de importancia para representar las causas de la variabilidad? ¿Para reproducir los comportamientos observados utilizando probabilidades determinadas empíricamente?

Colectivos. ¿Los individuos forman o pertenecen a agrupaciones que afectan y son afectadas individuos?, estos colectivos pueden ser de niveles intermedios importantes de la organización de un MBI, como grupos sociales, cardúmenes de peces, bandadas de aves, redes humanas y organizaciones. Se representa como una propiedad emergente de los individuos, es decir cómo se conforman los colectivos, como por ejemplo la reunión de la bandada de aves como resultado de los comportamientos individuales, o es el colectivo simplemente una definición planteada por el modelador, tal como el conjunto de individuos con ciertas propiedades, definido como una clase separada de la entidad con sus rasgos y variables de estados propias.

Observación. ¿Cuáles salidas del modelo son necesarias para observar sus dinámicas internas, así como su comportamiento a nivel de sistema?, ¿Qué herramientas (gráficas, archivos de salida, datos sobre individuos etc.) son necesarios para obtener estas salidas?

Inicialización

Se debe describir como inicia el modelo, el Mundo en el inicio de la simulación, porque los resultados del modelo a menudo dependen de aquellas condiciones iniciales, como el número inicial de agentes creados y los valores dados a sus variables de estado (localización, tamaño, edad, etc.), además de los valores iniciales de las variables ambientales (Grimm *et al.* 2010, Railsback y Grimm 2011).

Datos de insumo

Son datos globales que generalmente representan variables ambientales o climáticas, las cuales pueden variar en el tiempo y son leídas durante la simulación dentro del modelo (Grimm *et al.* 2010, Railsback y Grimm 2011).

Submodelos

Una vez definida la estructura general del modelo y los conceptos individuales, se deben considerar los procesos principales lo cual se desarrolla en los submodelos. Se debe pensar en los submodelos como un proceso más de los MBI, en su mayoría los submodelos son casi completamente independientes de cada uno y pueden ser diseñados y probados independientemente. Estos, son mencionados en la planificación y ahora se deben describir en detalle. Para hacer replicables los MBI se deben escribir, las ecuaciones, las reglas lógicas y los algoritmos que constituyen los submodelos, su documentación y parámetros (Grimm *et al.* 2010, Railsback y Grimm 2011).

1.5. MARCO METODOLÓGICO

El presente proyecto, se sustenta en el análisis, organización y discusión crítica de los resultados obtenidos de la integración de modelos dinámicos y estáticos, en tres artículos (Figura 12). i. Modelo estático, representado por modelos de distribución de la garrapata común del ganado en la región del Altiplano cundiboyacense; ii. Modelo dinámico determinístico, representado en un modelo por compartimentos que describen la dinámica de población la garrapata común del ganado en la región del Altiplano cundiboyacense; iii. Modelo dinámico estocástico, representado en un modelo espacialmente explícito de la dinámica de población la garrapata común del ganado en la región del Altiplano cundiboyacense.

Modelo estático, representado por modelos de distribución de la garrapata común del ganado en la región del Altiplano cundiboyacense

Los insumos para el desarrollo de este capítulo provienen de los resultados del proyecto “Modelización del efecto del cambio climático sobre la garrapata del ganado *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* en el Trópico Alto Andino” , el cual tenía como objetivo “Aportar, mediante el uso de sistemas georeferenciados y de modelos basados en cambio climático, información sobre la distribución y dinámica poblacional de la garrapata del ganado

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Rhipicephalus (Boophilus) microplus en el trópico medio y alto de Colombia. Dicho proyecto fue ejecutado por CORPOICA junto con el Ministerio de Agricultura e IDEAM.

Información de la especie: registros de presencia de la garrapata del ganado en la región del altiplano. En el año 2009 se seleccionaron aleatoriamente 108 fincas a lo largo del Altiplano cundiboyacense ubicadas entre los 1900 y los 3000 m, para establecer la presencia de la garrapata del ganado en la región; estas fincas fueron seleccionadas teniendo en cuenta los registros en las agremiaciones ganaderas como FEDEGAN y ANALAC. Como resultado se identificaron 34 fincas con presencia de la garrapata del ganado, distribuidas en 30 municipios de Cundinamarca y Boyacá; los especímenes fueron colectados sobre el ganado en su estado larvario y adulto, y sobre el suelo en estados de Teleogina (hembra adulta engordada y fecundada, que cae al suelo para iniciar el proceso de oviposición) y larva (Cortés *et al.* 2010).

Información de la especie: Se utilizó información climática, topográfica, biológica y fisiográfica proveniente de (IDEAM, CORPOICA 2012, Shuttle Radar Topography Mission, IGAC, 2002 – 2006), la cual se desplegó cartográficamente a una resolución de 30 m, con proyección Magna Sirgas, origen Bogotá (IGAC 2004).

Construcción de los modelos de distribución de *R (B) microplus*

Se utilizaron dos herramientas de modelación para la distribución geográfica de la especie. La primera fue Maxent (Phillips, *et al.* 2006) que trabaja utilizando puntos de presencia únicamente y genera pseudo-ausencias. La segunda herramienta utilizada fueron los árboles de clasificación con el algoritmo Random Forest (R Core team 2013, Liaw y Wiener 2002), que permite utilizar presencia - ausencia, de tal manera que posibilita tener una perspectiva más completa de la relación ambiental con la distribución de esta especie.

Modelo dinámico determinístico, representado en un modelo por compartimentos que describen la dinámica de población la garrapata común del ganado en la región del Altiplano cundiboyacense.

El modelo representa los cambios resultantes de la influencia de las variables climáticas (temperatura, índice de precipitación y déficit de saturación); paisaje (bosques y mosaicos

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

con cultivos y/o bosque (áreas óptimas); arbustales, herbazales, mosaico de cultivos con pastos (medianamente óptimas); pastos abiertos y áreas abiertas (desfavorables); densidad y resistencia del hospedero (*Bos taurus*) sobre la dinámica de población de *R (B) microplus*, estructurada por: la densidad poblacional, la fecundidad, tasas de mortalidad y sobrevivencia en un intervalo de tiempo, definido como una semana.

La estructura metodológica general del modelo se adaptó de Mount *et al.* (1991), con datos ambientales locales de la región de estudio el Altiplano Cundiboyacense, donde se incluyó el paisaje (componente que no es tenido en cuenta por estos autores), así como las variaciones en la temperatura, densidad del bovino, y condiciones del paisaje. El enfoque de este modelo es local, aunque su conceptualización es general y puede adaptarse a otras condiciones ambientales.

Modelo dinámico estocástico, representado en un modelo espacialmente explícito la dinámica de población la garrapata común del ganado en la región del Altiplano cundiboyacense.

Se planteó un modelo estocástico, espacial y temporalmente explícito, basado en agentes e individuos, con el propósito de comprender la dinámica espacial y temporal de la garrapata común del ganado *R (B) microplus* en una nueva área de distribución. El modelo se desarrolló en una grilla que representa las condiciones del Altiplano cundiboyacense, el *home range* de *Bos taurus*, como especie hospedero de esta garrapata, los estados de desarrollo del parásito y la configuración del paisaje de la región. Este modelo se fundamentó en la conceptualización de los submodelos desarrollados en el capítulo del modelo dinámico determinístico.

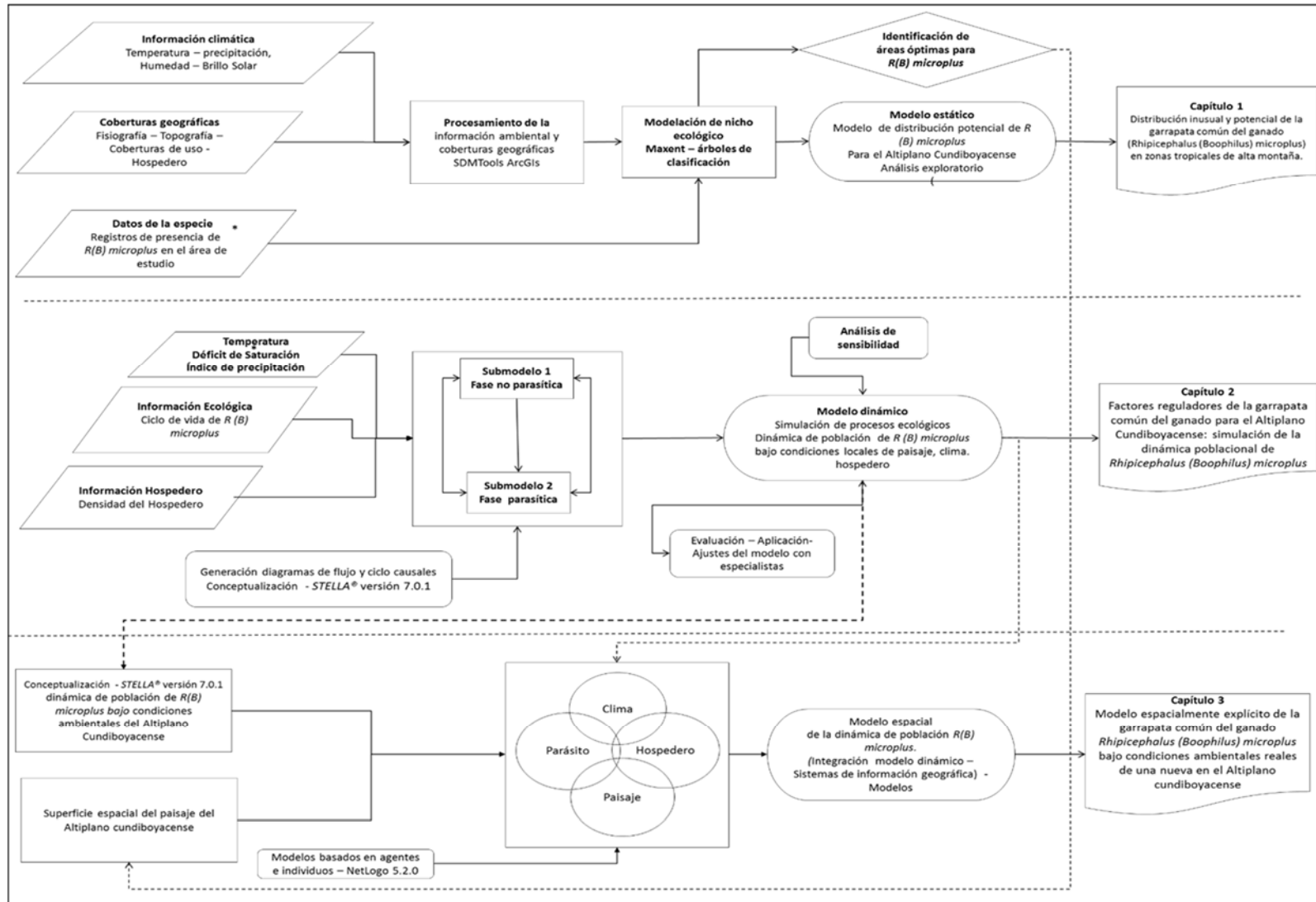


Figura 12. Resumen de los procedimientos para desarrollar la investigación. Estructura metodológica general, para evaluar la distribución y determinantes ambientales de la garrapata común del ganado *R(B) microplus*, en el Altiplano cundiboyacense.

1.6. BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, B. J., H. R. Akcakaya, M. B. Araujo, D. A. Fordham, E. Martinez-Meyer, W. Thuiller y B. W. Brook. 2009. Dynamics of range margins for metapopulations under climate change. *Proc. R. Soc. B.*, 276: 1415–1420
- Arias, J.J., A. Betancourt., C.E. Valencia y H. Sardi. 1991. Identificación de Garrapatas de Bovinos en el Municipio de Tumaco (Colombia). *Revista ICA*. Vol 26. 145 – 151.
- Begon, M., C.R. Townsend, y J. L. Harper. 2006. *Ecology: from individuals to ecosystems*. Fourth edition published. Blackwell publishing. USA
- Busby, J. R. 1991. BIOCLIM, a bioclimate analysis and prediction system. _/ In: Margules, C. R. and Austin, M. P. (eds), *Nature conservation: cost effective biological surveys and data analysis*. CSIRO, pp. 64-68.
- CORPOICA 2008. Formulación proyecto “Modelización del efecto del cambio climático sobre la distribución de la garrapata *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* en el trópico alto colombiano
- CORPOICA 2012. Plan para el manejo de los impactos en el sector agropecuario ocasionados por la emergencia Invernal. C.I. Tibaitata. 341p.
- Cortés – Vecino, J.A., J.A. Betancourt Echeverri., J. J, Argüelles – Cárdenas y L.A. Pulido – Herrera. 2010. Distribución de garrapatas *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* en bovinos y fincas del Altiplano Cundiboyacense (Colombia). *CORPOICA Cienc. Tecnol. Agropecu.* **11**(1): 73-8
- Davis, A.J., L.S. Jenkinson, J.L. Lawton, B. Shorrocks y S Wood. 1998. Making mistakes when predicting shifts in species range in response to global warming. *Nature*, 391: 783–786.
- De Angelis, D.L. y V. Grimm. 2014. Individual-based models in ecology after four decades. *F1000Prime Reports* (6) 39: 1-6. <http://f1000.com/prime/reports/b/6/39>
- De Campos Pereira, M., M. Bahia- Labruna, M.P. J. Szabó y G. Marcondes-Klafe. 2008. *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* Biología, controle e resistência. MedVet Livros, São Paulo, Br. 169 pp.
- Díaz-Porras, D.F. 2006. El nicho ecológico y la abundancia de las especies. Tesis para obtener el título de Maestro en Ciencias Biológicas (Biología Ambiental). Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. 111 pp.

- Elith, J., M. Kearney y S. Phillips. 2010. The art of modeling range-shifting species. *Methods in Ecology and Evolution*, 1: 330–342
- Estrada-Peña, A. 2001. Climate warming and changes in habitat suitability for *Boophilus microplus* (Acari: Ixodidae) in Central America. *Journal of Parasitology* 87(5): 978-987.
- Estrada-Peña, A., C. Sánchez- Acedo., J. Quílez y E. Del Cacho. 2005. A retrospective study of climatic suitability for the tick *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* in the Americas. *Global Ecology and Biogeography* 14: 565–573.
- Evans, D.E. 1978. *Boophilus microplus* ecological studies and tick fauna synopsis related to the developing cattle industries in the Latin American a Caribbean Region. Ph.D. Thesis. Cnaa/NE London Polytechnic (now Life Science Department, University of East London). United Kingdom. 283 p.
- Graham, CH; S, Ferrier; F, Huettman; C, Moritz; AT, Peterson. 2004 New developments in museum based informatics and applications in biodiversity analysis. *Trends Ecol. Evol.*, 19, 497–503.
- FAO 1984. Tick and Tick Borne Diseases Control: A Practical Field Manual. (Vol. I-II): FAO-UNDP. p. 297, 374-382.
- Ford, A. 1999. Modeling the Environment. An introduction to System Dynamics Models of Environment System. ISLAND PRESS. USA. 395Pp.
- Forrester, J. 1961. Industrial dynamics. Waltham, MA: Pegasus Communications.
- Gause, G.F. 1934. The Struggle for Existence. Reprinted 1969. Hafner Publishing. Company, New York.
- Ginovart, M., Portell, X., Ferrer-Closas, P. y Blanco, M. (2012). Modelización basada en el individuo: una metodología atractiva para el estudio de biosistemas. *Enseñanza de las Ciencias*, 30 (2), pp. 93-108.
- Graham, C.H., S. Ferrier, F. Huettman, C. Moritz y A.T. Peterson. 2004. New developments in museum based informatics and applications in biodiversity analysis. *Trends Ecol. Evol*, 19: 497–503
- Grant, W.E., S.L Marin y E.K. Pedersen. 2001. Ecología y manejo de recursos naturales: análisis de sistemas de simulación. San José, C.R.: IICA. Xiv, 340 p.
- Grimm, V., U. Berger., D.L. DeAngelis., J. Gary Polhill., A. Giske., y S. Railsback. 2010. The ODD protocol: A review and first update. *Cological Modelling* 221: 2760-2768
- Guglielmone, A. 1995. Epidemiology of Babesiosis and Anaplasmosis in South and Central America. *Veterinary Parasitology*, 57(1-3), 109-119.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

- Guisan, A y W. Thuiller. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 8: 993–1009.
- Guisan, A y N.E. Zimmermann. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecol. Model*, 135: 147–186.
- Gutiérrez, F. D. P., D. L. Gil y C. Lasso. A. 2010. Análisis de riesgo y propuesta de categorización de especies introducidas para Colombia. 200 pp.
- Hannon, B y M. Ruth. 1997. Modeling dynamic biological systems. Springer-Verlag New York, United States of America 395p
- Hutchinson, G. E. 1978. What is a niche? en: An introduction to population ecology. Yale University Press. Pp. 152-212.
- Jiménez – Valverde, J., A.T. Peterson., J. Soberón., J.M. Overton., P. Aragón. y J.M. Lobo. 2011. Use of niche model in invasive species risk assessments. *Biol Invasions*.13: 1785 – 2797.
- Levins, R. 1966. The strategy of model building in population ecology. *Am. Sci.*, 54: 421–431.
- Liaw, A. y M. Wiener 2002. Classification and Regression by randomForest. *R News* 2(3): 18–22.
- Meffe, G.K. y R. Carroll, and Contributors. 1997. Principles of Conservation Biology. 2nd ed. U.S.A. Sinauers Associates, INC. Publishers. 715p.
- Morrison, M., G. Marcot y W. Mannan. 1992. Wild-life habitat relationships. Concepts and applications. The Univ of Wisconsin Press. Wisconsin USA. 343p.
- Muñoz, M.E.S., R. Giovanni, M.F. Siqueira, T. Sutton, P. Brewer, R.S. Pereira, D.A.L. Canhos y V.P. Canhos. 2009 "openModeller: a generic approach to species' potential distribution modelling". *GeoInformatica*. DOI: 10.1007/s10707-009-0090-7
- Ortiz, R.D. 2004. Costos de las estrategias de medicina veterinaria preventiva en ganaderías de leche del cordón lechero de Boyacá. Tesis de Pregrado en Medicina Veterinaria y zootecnia. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (Ud ca), Bogotá, Colombia. 67-69 p.
- Pearman, P.B., A. Guisan, O. Broennimann y C. F. Randin. 2008. Niche dynamics in space and time. *Trends in Ecology and Evolution*, 23 (3): 149 – 158.
- Pearson, R y T. Dawson. 2003. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology y Biogeography*, 12: 361–371.

- Pearson, R. G. 2007. Species' Distribution Modeling for Conservation Educators and Practitioners: Synthesis. American Museum of Natural History, New York. Disponible en: <http://ncep.amnh.org>.
- Pereira, M. y M. Labruna. 2008. *Rhipicephalus (Boophilus) microplus*. En: Pereira, M.C.; Labruna, M.B.; Szabó, M.P.J.; Klafke, G.M. (Eds.), *Rhipicephalus (Boophilus) microplus*. Biologia, Controle e Resistência. São Paulo.
- Peterson, A.T., M.A. Ortega, J. Bartley., V. Sánchez-Cordero. J. Soberón., R.H. Buddemeier. Y D.R. Stockwell. 2002 Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature*, 416: 626-629.
- Peterson, A.T., J. Soberón., R.G. Pearson., R.P. Anderson; E. Martínez – Meyer; M. Nakamura y M. Bastos – Araujo. 2011. Ecological Niches and geographic Distributions. Princeton University Press. 315p.
- Phillips, S.J., R.P. Anderson y E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190: 231–259.
- Pickett, S.T.A., J. Kolasa y C.G. Jones. 1994. Ecological Understanding. The Nature of Theory and the Theory of Nature. Academic Press, New York, New York, USA
- R Core Team. 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>
- Railsback, S y V. Grimm. 2011. Agent-Based an Individual – Based Modeling. A practical introduction. Princeton University Press. United Kingdom. 625pp.
- Richardson, D. M., Pysek, P., Rejmánek, M., Barbour, M. G., Panetta, F. D., y West, C. J. 2000. Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions. *Diversity and Distributions*, 6, 93–107
- Schoener, T. W. 1989. The ecological niche. In: J. M. Cherrett (ed.) *Ecological Concepts: The contribution to an understanding of the natural world*. Blackwell Scientific, Oxford, England. Pp. 79-113.
- Soberón, J. y A.T. Peterson. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics*, 2: 1-10.
- Sterman, J.D. 2000. Business Dynamics. Systems Thinking and Modeling for a Complex World. McGraw Hill. USA. 947Pp
- Stockwell, D.R.B. 1999. Machine learning methods for ecological applications: Genetic Algorithms II. *Species Distribution Modeling*, chapter 5: 123-144.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

- Sutherst, R.W. 1987. Ticks and tick-born diseases: proceedings of an international workshop on the ecology of ticks and epidemiology of tick – borne diseases, held at Nyanga, Zimbabwe, ACIAR PROCEEDINGS. No. 17. 159p.
- Turner, M.G., H.R. Gardner y R.V. O'Neill. 2001. Landscape ecology in theory and practice. Pattern and process. Springer Science Business Media, Inc. USA. 400p
- Vincenot, C.E., F. Giannino., M. Rietkerk., K. Moriya y S. Mazzoleni. 2011. Theoretical considerations on the combined use of System Dynamics and individual-based modeling in ecology. Ecological Modelling 222:210–218.
- Wissel, C., 1992. Aims and limits of ecological modeling exemplified by island theory. Ecol. Model, 63: 1–12.

2. DISTRIBUCIÓN INUSUAL Y POTENCIAL DE LA GARRAPATA COMÚN DEL GANADO (*Rhipicephalus (Boophilus) microplus*) EN ZONAS TROPICALES DE ALTA MONTAÑA

Resumen

Se presentan las áreas potenciales de distribución de la garrapata común del ganado *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* en el altiplano cundiboyacense, mediante el uso de dos algoritmos de modelamiento de nicho ecológico (Maxent y árboles de clasificación). Los algoritmos fueron complementarios, con rendimientos óptimos y significativos, registrando valores de AUC (0.70 Maxent y 0.90 Árboles de Clasificación), y bajos valores de errores omisión (0,04 % Maxent y 4,6 % árboles de clasificación). El paisaje, junto con la presencia del hospedero, la altitud, la precipitación, la temperatura y la humedad del primer trimestre húmedo, fueron las variables más relevantes en el modelamiento. La región nororiental del altiplano presenta las áreas potencialmente óptimas para el establecimiento de esta especie.

Palabras clave. Modelos de distribución de especies. Ixodidae. Ectoparásitos. Altiplano cundiboyacense.

2.1. INTRODUCCIÓN

La garrapata común del ganado *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* (en adelante *R (B) microplus*), es un importante ectoparásito hematófago de origen asiático (Bowman y Nuttall, 2008), que causa graves efectos sobre sus hospederos, como el ganado bovino reflejándose en patologías que generan morbilidad y mortalidad (Cortés *et al.* 2010, Estrada – Peña *et al.* 2005); en Colombia, esta especie ha sido identificada como el único transmisor de patógenos como *Babesia bovis* y *Babesia bigemina* (Cortés-Vecino *et al.* 2010). La distribución geográfica de las especies de garrapatas y sus fluctuaciones anuales de abundancia están determinadas por el clima (Estrada – Peña 1999) así como por su entorno, la configuración del paisaje y los movimientos de sus hospederos (Teel *et al.* 1997); Estrada Peña (2001) y Estrada Peña *et al.* (2005), sugieren que *R (B) microplus*, tiende a aumentar su distribución altitudinal, asociado al aumento de la temperatura en las últimas décadas.

Esta especie de origen indo-asiático, ha sido registrada en regiones tropicales y subtropicales y se distribuye en América, desde el Norte de Argentina hasta México (excepto en Chile). Al parecer el primer reporte de esta especie para Colombia fue realizado en 1923 en Barranquilla y Bucaramanga por Dunn (Cortés-Vecino *et al.* 2010); también ha sido registrada en altitudes desde el nivel del mar hasta los 2.000 m en los departamentos de Nariño, Caldas, Antioquia, Meta, Cundinamarca y Boyacá (Hernández *et al.* 1977, Arias *et al.* 1991, Betancourt *et al.* 1992).

Recientemente se registró *R (B) microplus* en el altiplano cundiboyacense entre los 2.500 y 2.800 m (CORPOICA 2008, 2011, Cortés-Vecino *et al.* 2010) lo cual llama la atención, ya que constituye la propagación de esta especie en altitudes superiores a las cuales ha sido observada habitualmente en el país. Esta región presenta una economía basada en la ganadería de leche, la cual está constituida especialmente por individuos de la especie *Bos taurus*, de las razas Holstein, Normando o cruces entre ellas. Esta práctica pecuaria se ha asentado en los altiplanos del país y se ha visto afectada por introducciones accidentales de garrapatas debido a movilización de animales desde otras regiones de fincas aledañas a la Sabana de Bogotá (CORPOICA 2008). Debido a que esta introducción del parásito ha

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

sido muy reciente, existe todavía un desconocimiento sobre su biología y comportamiento en esta región, lo cual podría repercutir en malas prácticas ganaderas, reflejadas en el incremento del uso y frecuencia de tratamientos químicos ya observados por Ortiz (2004) y durante el desarrollo de este trabajo, que pudieran afectar la producción de leche, así como la economía de la cadena productiva del sector ganadero y la seguridad alimentaria.

A partir de la situación arriba mencionada, surgen inquietudes como si existe riesgo potencial de establecimiento de *R (B) microplus* en el altiplano cundiboyacense, de qué manera influyen las condiciones ambientales de la región en el establecimiento de esta especie y cuál es el papel de las actividades ganaderas en la introducción de *R (B) microplus* en la región. De allí se deriva el propósito de este estudio, que pretende identificar las áreas ambientalmente adecuadas para la garrapata común del ganado que representen los procesos ecológicos involucrados en su introducción y establecimiento en el altiplano cundiboyacense. Teniendo en cuenta la influencia de variables ambientales como, factores abióticos (clima, geomorfología) y bióticos (coberturas de uso de suelo, presencia de su hospedero), se pretende establecer si existen condiciones aptas en el altiplano que favorezcan el establecimiento de *R (B) microplus* en la región y dónde se encuentran ubicadas las áreas que cuentan con esas condiciones.

2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.1. Área de Estudio

El contexto geográfico de este estudio es el altiplano cundiboyacense, ubicado en la cordillera Oriental colombiana, desde el páramo de Sumapaz hasta la base de la Sierra Nevada del Cocuy, en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá. Representa una extensión aproximada de 19.690 km², comprende altitudes entre los 2.000 y 3.000 m y abarca tres regiones planas bien diferenciadas: la Sabana de Bogotá, los valles de Ubaté - Chiquinquirá y los valles de Duitama - Sogamoso (Figura 13).

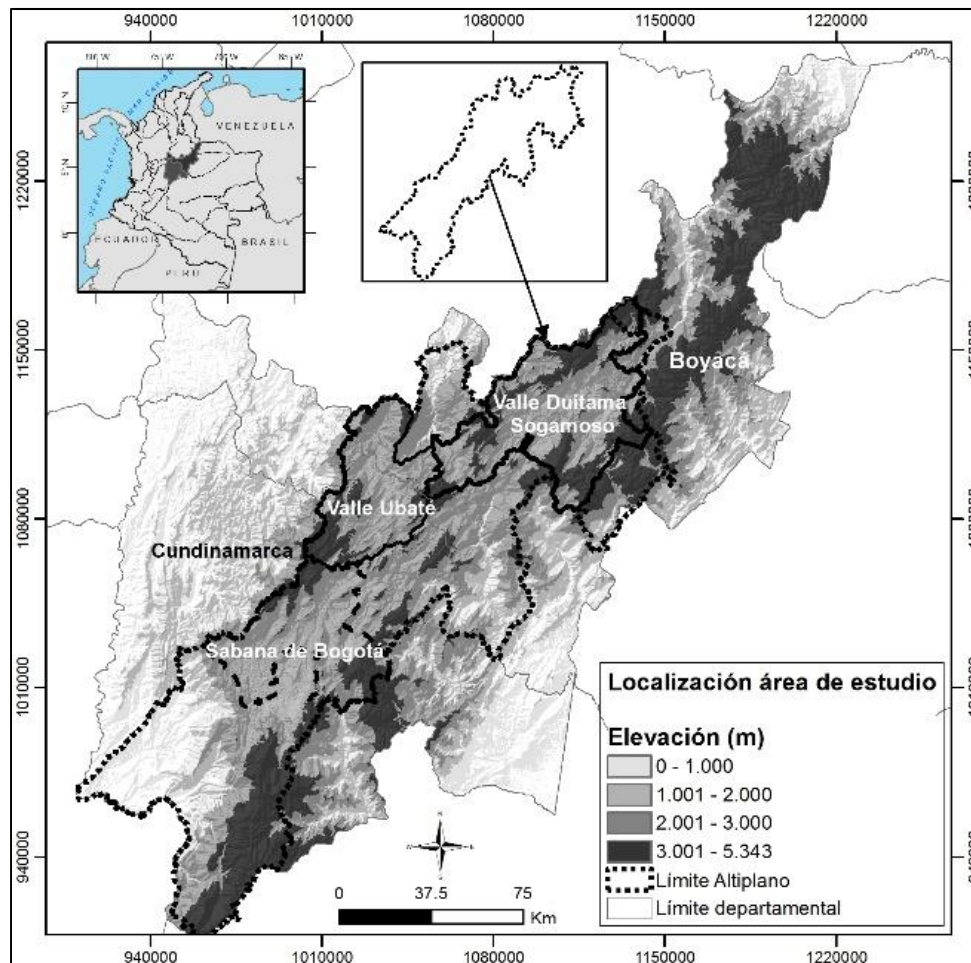


Figura 13. Localización del área de estudio. Se presentan en gama de grises los rangos altitudinales de la región, el área puntuada corresponde a la delimitación del Altiplano definida como la máscara para el mapeo de coberturas ambientales y modelos de distribución de *R (B) microplus*. Elaboración propia. Fuente: CORPOICA - IGAC.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

La delimitación del área de influencia del estudio se desarrolló a partir de la caracterización planteada por CORPOICA (2004 y 2012), con límites entre, los 6° 3'N - 72° 42'W, y los 3° 43'N y - 74° 27'W. Como resultado de esta caracterización se definieron los límites del área (máscara) que se utilizó para la ejecución de los modelos de distribución y el análisis general del trabajo (Figura 13).

Las condiciones climáticas de la zona presentan rangos de temperatura media entre los 12 y 16 °C (Rojas *et al.* 2010), (Figura 14); la precipitación presenta una fuerte variación entre los 500 y 2.000 mm anuales (Figura 14). A pesar de que los valores medios de precipitación hacen pensar que es una zona con buen registro de humedad, esta región es catalogada como una “isla seca” comparada con las zonas adyacentes, ya que la humedad tiende a mantenerse en los límites de la región, es decir en las zonas laterales occidental y oriental (Figura 14), debido a los vientos dominantes del este y su condición de altiplano en lo alto de una cordillera (Rodríguez - Eraso *et al.* 2010, CORPOICA 2012). La región del altiplano presenta un comportamiento bimodal trimestral en gran parte de su extensión, con excepción del oriente de la región, en donde se registra un comportamiento monomodal con un periodo de lluvias que abarca desde el mes de abril o mayo hasta el mes de octubre o noviembre, y un período seco que es más intenso en los meses de diciembre, enero y febrero (CORPOICA 2012).

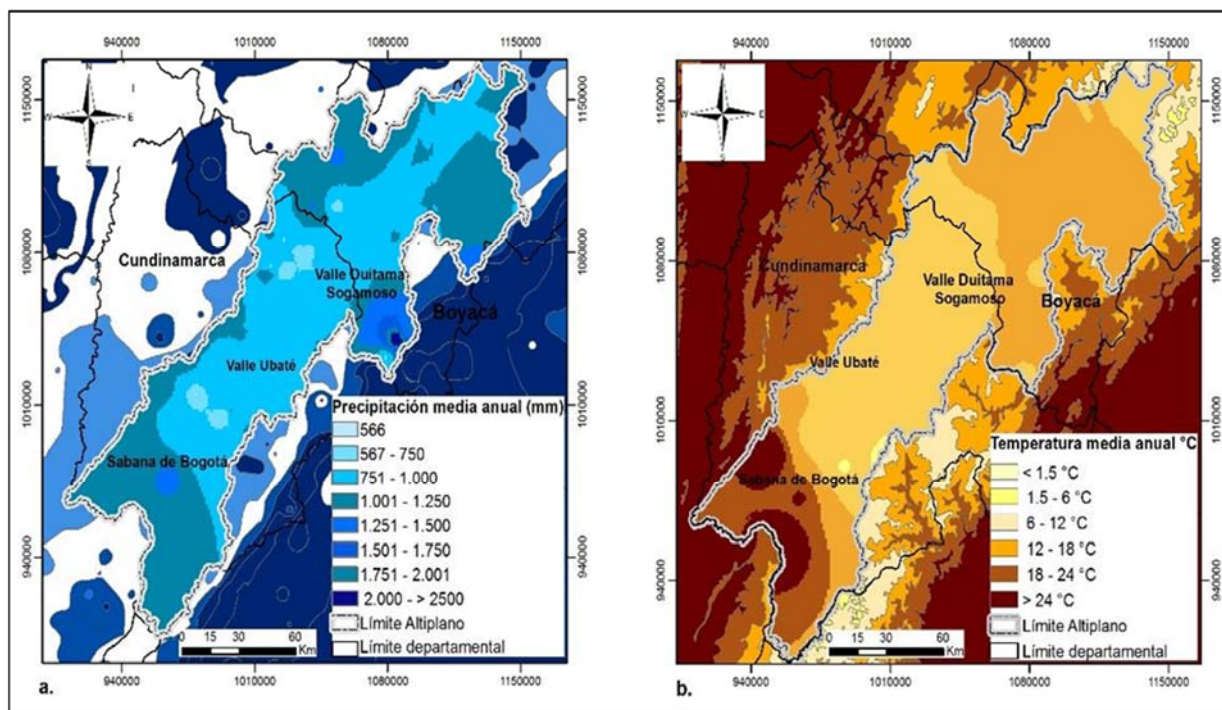


Figura 14. Variables climáticas de temperatura y precipitación en el Altiplano Cundiboyacense. La información corresponde a los valores del promedio anual para el periodo 1981-2010. Se observa la disminución de la precipitación desde la zona sur hacia el norte del Altiplano y el aumento hacia las regiones laterales este-oeste, permitiendo evidenciar la característica de “isla seca”. Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM; CORPOICA 2012.

Puntos de muestreo de *R (B) microplus*

Los datos de muestreo utilizados para el desarrollo de este trabajo provienen del proyecto Modelización del efecto del cambio climático sobre la distribución de la garrapata *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* en el trópico alto colombiano, ejecutado por CORPOICA (2008 – 2011).

Los puntos de presencia y ausencia se obtuvieron a partir de un muestreo aleatorio simple realizado entre abril y noviembre del 2009 en 108 fincas (n) ubicadas en 54 municipios de Boyacá y 41 de Cundinamarca, entre los 2000 – 3000 m de altitud. “Estas fincas fueron seleccionadas teniendo en cuenta el registro de vacunación antiaftosa de FEDEGAN, ciclo

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

B del año 2007. Para definir el tamaño de la muestra se determinó la probabilidad de que un hato estuviera infestado por la garrapata, aceptando un nivel de confianza del 95% y asumiendo un porcentaje de fincas infestada del 3%. Para la delimitación se utilizó la fórmula recomendada por De Blas *et al.* (2000) para determinación de enfermedad, lo cual es diferente a prevalencia. La fórmula es la siguiente:

$$n = [1 - (1 - NC)^{1/ds}] - [N - ((d - 1)) / 2]$$

Donde n= tamaño de la muestra requerida

N= número de predios lecheros

d= número de fincas con presencia de garrapatas

NC= nivel de confianza en tanto * 1 (i.e. 0.95)

De este muestreo 81 fincas corresponden al área de influencia delimitada, de las cuales 13 fincas cuentan con la presencia de la garrapata y 68 con ausencias (Figura 15). Los especímenes fueron colectados sobre el ganado en diferentes estados (larva, ninfa y adulto) y sobre el pasto en estado de larva. (CORPOICA 2011, Cortés *et al.* 2010).

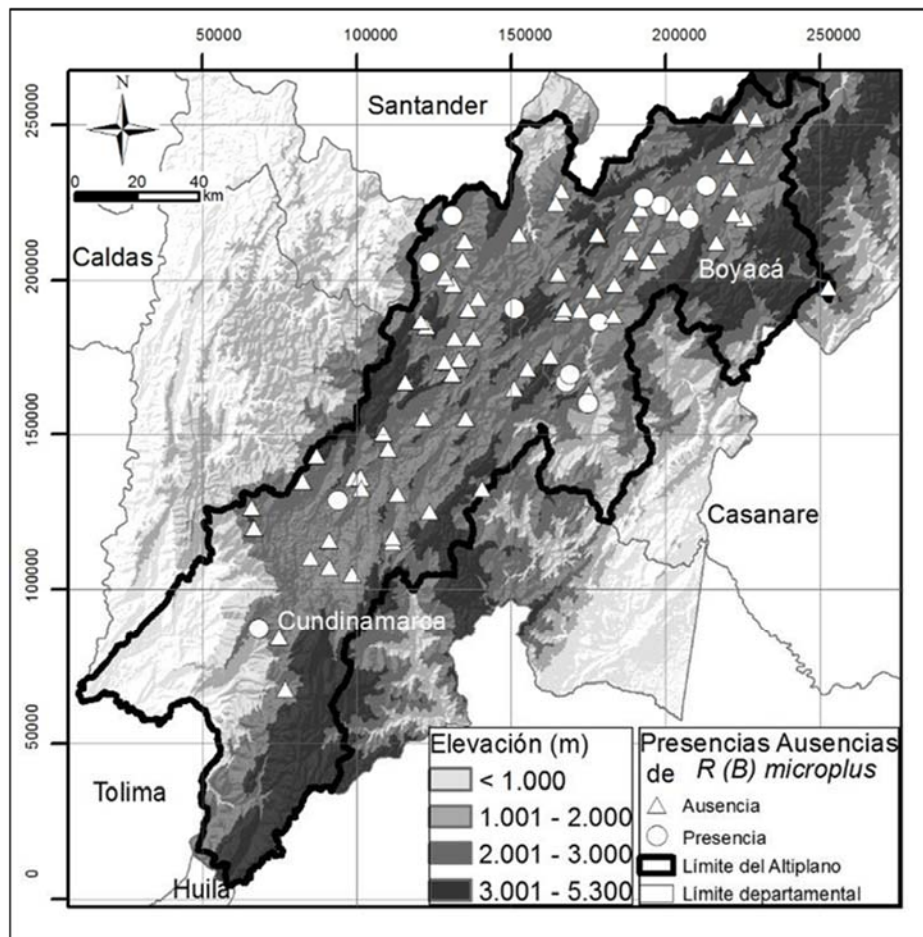


Figura 15. Se ilustran los 81 Puntos de muestreo que representan las presencias y ausencias utilizadas para la modelación de la distribución potencial de la garrapata *R (B) microplus* en el Altiplano Cundiboyacense.

Datos ambientales

Se utilizó información climática, topográfica, biológica y fisiográfica proveniente de (Ideam, CORPOICA 2012, Shuttle Radar Topography Mission, IGAC, 2002 – 2006), la cual se desplegó cartográficamente a una resolución de 30 m, con proyección Magna Sirgas, origen Bogotá (IGAC 2004).

Variables climáticas

La información climática corresponde a la tendencia de 30 años para el período comprendido entre 1981 y 2010; contiene las variables de precipitación, temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima, brillo solar y humedad relativa, para cada uno de los trimestres secos y húmedos del año (Tabla 2). Estos datos pertenecen a los resultados del análisis compuesto y evaluación de los patrones de comportamiento de variables climáticas de la región del altiplano cundiboyacense, bajo los eventos ENOS (Niño – Niña), mediante un proceso de análisis exploratorio y estimación de datos faltantes, desarrollado por CORPOICA (2012). La información de las estaciones meteorológicas pertenece a la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR y al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, y se encuentran localizadas en los departamentos de Boyacá y Cundinamarca, entre los 100 y los 3.500 m de altitud (CORPOICA 2012).

Cabe anotar que el periodo durante el cual se realizaron los muestreos de *R (B) microplus* se encontraba bajo influencia del fenómeno del Niño, razón por la que se utilizó la información climática asociada a este evento. El evento climático Niño es un importante fenómeno de variabilidad climática que afecta los patrones de comportamiento mensual de las variables climáticas (temperatura – precipitación y derivadas), representándose en períodos con disminución en los regímenes de precipitación, siendo esta variable la que presenta más manifestaciones de los ENOS en Colombia, además de altas probabilidades de que se presente aumento en la temperatura media (CORPOICA 2012). Estas alteraciones climáticas afectan los ciclos biológicos de las especies ya sea retrasándolos, inhibiéndolos o acelerándolos, por lo tanto, los resultados de este modelamiento pueden verse afectados ya que el ciclo de la garrapata no podría presentarse como regularmente se presentaría.

Variables fisiográficas y biológicas

Se utilizaron variables topográficas, fisiográficas y biológicas, cuyo criterio principal de selección fue la relación con la especie en términos directos o indirectos, de acuerdo a sus

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

requerimientos ecológicos conocidos (Teel *et al.* 1997, Betancourt *et al.* Estrada-Peña *et al.* 2005, Bowman y Nuttall 2008, De Campos Pereira *et al.* 2008). Con respecto a la topografía se seleccionó la altitud, ya que se ha observado que la garrapata está aumentando su distribución altitudinal, lo cual se ha relacionado con el aumento de la temperatura en zonas montañosas. Esta variable proviene del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) con una resolución de 30 m (Tabla 3). Para las variables fisiográficas se tuvieron en cuenta los tipos de paisaje, de tal manera que se incluyeran características del relieve para complementar las variables de altitud y hospedero. Esta información proviene del estudio de suelos de Cundinamarca y Boyacá (CORPOICA - IGAC, 2002), (Tabla 2). Las coberturas de usos de suelo se incluyeron para involucrar las preferencias de hábitat descritas en Teel *et al.* (1997), lo cual tiene efecto limitante o favorable sobre la distribución de las garrapatas y el movimiento del hospedero. La información de esta variable proviene de IDEAM *et al.* (2002) escala 1:100.000 (Tabla 3); la variable bovinos corresponde al hospedero principal de esta garrapata por lo que su presencia o ausencia es determinante para el desarrollo de este parásito. La información de esta variable corresponde al censo ganadero de Colombia (MADR 2006) (Tabla 3).

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Tabla 2. Variables climáticas incluidas en el proceso de modelación de la distribución de *R (B) microplus* para el Altiplano Cundiboyacense.

Código Variables	Descripción	Unidades
Tmax_DJF	Temperatura máxima primer trimestre seco	°C
Tmin_DJF	Temperatura mínima primer semestre seco	°C
Tp_DJF	Temperatura media primer semestre seco	°C
BS_DJF	Brillo solar primer semestre seco	Hr/Día
H_DJF	Humedad relativa primer trimestre seco	%
PP_DJF	Precipitación primer semestre seco	mm
Tmax_MAM	Temperatura máxima primer semestre húmedo	°C
Tmin_MAM	Temperatura mínima primer semestre húmedo	°C
Tp_MAM	Temperatura media primer semestre húmedo	°C
BS_MAM	Brillo solar primer semestre húmedo	Hr/Día
H_MAM	Humedad relativa primer semestre húmedo	%
PP_MAM	Precipitación primer semestre húmedo	mm
Tmax_JJA	Temperatura máxima segundo trimestre seco	°C
Tmin_JJA	Temperatura mínima segundo trimestre seco	°C
Tp_JJA	Temperatura media segundo trimestre seco	°C
BS_JJA	Brillo solar segundo trimestre seco	Hr/Día
H_JJA	Humedad relativa segundo trimestre seco	%
PP_JJA	Precipitación segundo trimestre seco	mm
Tmax_SON	Temperatura máxima segundo semestre húmedo	°C
Tmin_SON	Temperatura mínima segundo semestre húmedo	°C
Tp_SON	Temperatura media segundo trimestre húmedo	°C
BS_SON	Brillo solar segundo semestre húmedo	Hr/Día
H_SON	Humedad relativa segundo semestre húmedo	%
PP_SON	Precipitación segundo trimestre húmedo	mm

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Tabla 3. Variables fisiográficas y biológicas incluidas en el proceso de modelación de la distribución de *R (B) microplus* para el Altiplano Cundiboyacense. Fuentes: IGAC - CORPOICA 2002, IDEAM *et al.* 2002, MADR 2006, SRTM. Todas las variables se representan con una resolución espacial de 30m.

Variable	Nombres – descripción	Porcentaje de representación
Usos de suelo	Mosaico Pastos Cultivos	22.53
	Mosaico Pastos - Cultivos -Bosques	5.86
	Pastos (Limpios, enmalezados, arbolados)	19.62
	Mosaico de cultivos-pastos-espacios naturales	9.73
	Arbustales –herbazales	19.93
	Bosques	8.85
	Infraestructura	2.50
	Cultivos	4.32
	Tierras desnudas -Arenales	1.14
	Zonas quemadas	0.01
	Sistemas Hídricos	0.73
	Zonas Pantanosas	0.23
	Extracción minera	0.13
	Afloramientos rocosos	0.02
	No hay información (nubes)	5.40
Paisajes	Montaña	
	Planicie/Llanura	
	Valle	
	Piedemonte	
	Lomerío	
	Altiplanicie, altillanura	
Modelo de elevación digital	Proviene del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) con una resolución de 30. Representa la variable de altitud en el modelamiento.	
Bovinos (Cabezas / Ha)	Fue utilizada para representar el hospedero principal de <i>R (B) microplus</i> . Proviene del censo ganadero (MADR 2006).	

2.2.2. Construcción de los modelos de distribución de *R (B) microplus*

Para identificar las áreas de distribución de la garrapata en el altiplano cundiboyacense y las variables ambientales que más se relacionan con su distribución, se utilizaron dos herramientas de modelación para la distribución geográfica de la especie. La primera fue Maxent (Phillips, *et al.* 2006) que trabaja utilizando puntos de presencia únicamente y genera pseudo-ausencias. La segunda herramienta utilizada fueron los árboles de clasificación con el algoritmo Random Forest (R Core team 2013, Liaw y Wiener 2002), que permite utilizar presencia - ausencia, de tal manera que posibilita tener una perspectiva más completa de la relación ambiental con la distribución de esta especie. El objeto de utilizar estas dos herramientas de modelamiento fue tener salidas complementarias, tratando de aprovechar todos los datos obtenidos de los muestreos realizados, es decir, presencias y ausencias verdaderas, lo cual fortalece los resultados. De otra parte, cabe señalar que estas dos herramientas representan mejor la distribución de especies con distribuciones más amplias y en estudios de paisaje (Hernandez *et al.* 2008).

Máxima entropía (Maxent)

Maxent es un algoritmo que genera modelos de distribución geográfica, a partir de una serie de correlaciones estadísticas entre variables ambientales y puntos de presencia conocidos de una especie, que permiten identificar áreas potencialmente adecuadas para esta, en una superficie geográfica. Su enfoque se basa en la segunda ley de la termodinámica enfocada a procesos ecológicos, la cual postula que en un sistema sin influencias externas se mueven procesos en dirección a la máxima entropía, es decir que la distribución espacial de una especie tenderá hacia la distribución más uniforme de una superficie geográfica, debido a la restricción de los valores esperados de las variables predictoras (ambientales) bajo la distribución estimada que coincide con su promedio empírico, es decir, valores promedio para el conjunto de registros de presencia solamente o datos de ocurrencia (Phillips *et al.* 2006, Pearman *et al.* 2008, Elith *et al.* 2011). Las salidas se presentan en valores de probabilidad, los cuales oscilan entre cero (0) y uno (1), donde 0 indica menos probabilidad de presencia y 1 mayor probabilidad. Para representar los resultados de este trabajo se

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

realizó una reclasificación, donde se asumieron como las áreas potencialmente aptas a partir del valor de probabilidad $P \geq 0,5$ y las áreas con valores inferiores se asumieron como áreas no aptas, generando una superficie binaria de 0 áreas no aptas y 1 para áreas aptas. Además, este algoritmo permite visualizar las curvas de respuesta de la especie ante las distintas variables ambientales, estima el aporte y la importancia de cada variable en la distribución de la especie (Phillips *et al.* 2006).

Los parámetros establecidos para ejecutar el algoritmo fueron: 100% de los datos para el entrenamiento (*training*)

100% de los datos para el entrenamiento (*training*), debido al bajo número de registros de presencia registrados en los muestreos ($n=13$). La generación de ausencias a partir de pseudoausencias fue asumida por el valor predeterminado en Maxent, 10.000; el formato de salida fue logístico, ya que de acuerdo a lo planteado por Phillips y Dudik (2008) es un formato robusto cuando la prevalencia es desconocida y más fácil de interpretar como la probabilidad de presencia de una especie. Por otro lado, el formato logístico estima la probabilidad de presencia asumiendo que el diseño de muestreo es tal que las localidades de presencia tienen una probabilidad igual o mayor a 0.5 (Phillips *et al.* 2006). El máximo de iteraciones fue 500; el tipo de réplica de corrida (*Replicate run type*) fue Bootstrap, el umbral de error de omisión fue *minimum training presence*; la medida de importancia y aporte de las variables predictoras se determinó mediante la prueba *Jackknife*.

Árboles de Clasificación - Random Forest

Los árboles de decisión o clasificación es un enfoque simple de regresión no paramétrico que sondea y explora datos con el objetivo de identificar la combinación de variables que puedan predecir con gran precisión la presencia de especies, ya que segmenta la muestra en grupos homogéneos respecto a la variable respuesta (Strobl *et al.* 2009). Por otro lado, el algoritmo de estimación de los parámetros y segmentación de los árboles de clasificación basado en *Random Forest*, es un tipo de método de partición desarrollado para trabajar con muestras (n) pequeñas y problemas grandes p ; involucran un ensamblaje (*ak: set*) de árboles de clasificación que son calculados en subconjuntos aleatorios de datos, usando un subconjunto aleatoriamente restringido y predictores seleccionados para cada uno de

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

los nodos. De esta manera, *random forest* es capaz de examinar mejor la contribución y el comportamiento que cada predictor tiene, aun cuando el efecto de un predictor debería ser usualmente dominado por competidores más significativos en modelos más simples (Strobl *et al.* 2009). Además, este algoritmo es robusto a la colinealidad de las variables predictoras y el resultado es la probabilidad de ocurrencia de la garrapata (basado en una función logística). Las salidas se presentan en valores de probabilidad, los cuales oscilan entre cero (0) y uno (1), donde 0 indica menos probabilidad de presencia y 1 mayor probabilidad. Se realizó el mismo proceso de reclasificación que en Maxent para representar los resultados.

Para ejecutar los árboles de clasificación se utilizó el paquete *R* (R Core team, 2013) con la librería *Random Forest* (Liaw y Wiener 2002); para evitar el sobreajuste de la clasificación se utilizó el 10 % de los datos para evaluar la tasa de error en la clasificación. Los parámetros ejecutados fueron: un número de 1000 árboles y 1000 repeticiones con *bootstrapping*, la homogeneidad de los nodos en los árboles se midió mediante la función de impureza utilizando el índice Gini y para identificación de las variables predictoras de mayor importancia, a partir de un ranking de importancia.

Evaluación del desempeño de los algoritmos

Este análisis pretende estimar el desempeño de las predicciones de la distribución espacial de *R. (B.) microplus* generadas por los dos algoritmos, más no compararlas puesto que el objeto de usar las dos herramientas, fue complementar las proyecciones de una herramienta considerada excelente pero que se basa solo en ausencias como es Maxent, con otra herramienta igualmente buena pero que se basa en ausencias y en presencias, como los Árboles de Clasificación, y de esta manera aprovechar los datos de ausencias verdaderas con las que se contaba. En el procedimiento de evaluación, se realizaron pruebas del área bajo la curva AUC (tasa de falsos positivos y falsos negativos vs. verdaderos positivos y negativos), empleando el valor n total de registros y utilizando los predichos de las salidas de los modelos vs. lo observado, para estimar la tasa de error en la clasificación. Además, se generaron las visualizaciones de la tasa de error de clasificación, sensibilidad, especificidad y medidas de precisión de cada modelo. Se realizó una correlación de Pearson con bondad de ajuste de las probabilidades de ocurrencia de

ambos modelos y así poder visualizar espacialmente la discrepancia de los modelos, además de permitir identificar el umbral para las probabilidades de presencia con menor sesgo. Para el desarrollo de estos análisis se utilizó el paquete *R* 3.2.1 (*R* Core team 2013) y la librería *ROCR* (Sing *et al.* 2005). Se calculó la extensión de áreas predichas bajo los análisis del AUC, con base en las áreas donde la probabilidad es distinta de cero, a partir de valores $p \geq 0,5$.

2.3. RESULTADOS

Se observa que los resultados de las dos herramientas (Maxent, Árboles de Clasificación), presentan coincidencia en la localización más no en la extensión de las áreas ambientalmente adecuadas o aptas para *R. (B) microplus*, (Figura 16A, 16B). Los dos métodos presentaron concordancia en 19.069 Km² (Figura 17a, 17f), la extensión de área predicha como apta para Maxent con $P \geq 5$ fue de 2.755 km² (Figura 17b, 17f) mientras que para los árboles de clasificación fue de 2.267 km² (Figura 17c, 17f). Se presentan los resultados para las dos técnicas consolidados en una única cobertura (Figura 6), con las áreas potencialmente no aptas generadas por *Random Forests* para aprovechar la fortaleza de esta metodología, junto con las áreas potencialmente aptas generadas por Maxent aprovechando igualmente su enfoque, de tal manera que los resultados de la distribución de la garrapata en el altiplano fuesen más robustos y consistente. No obstante, se presentan los resultados para cada una de las herramientas, junto con la evaluación de rendimiento de los dos modelos, como respaldo del análisis estadístico de este estudio.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

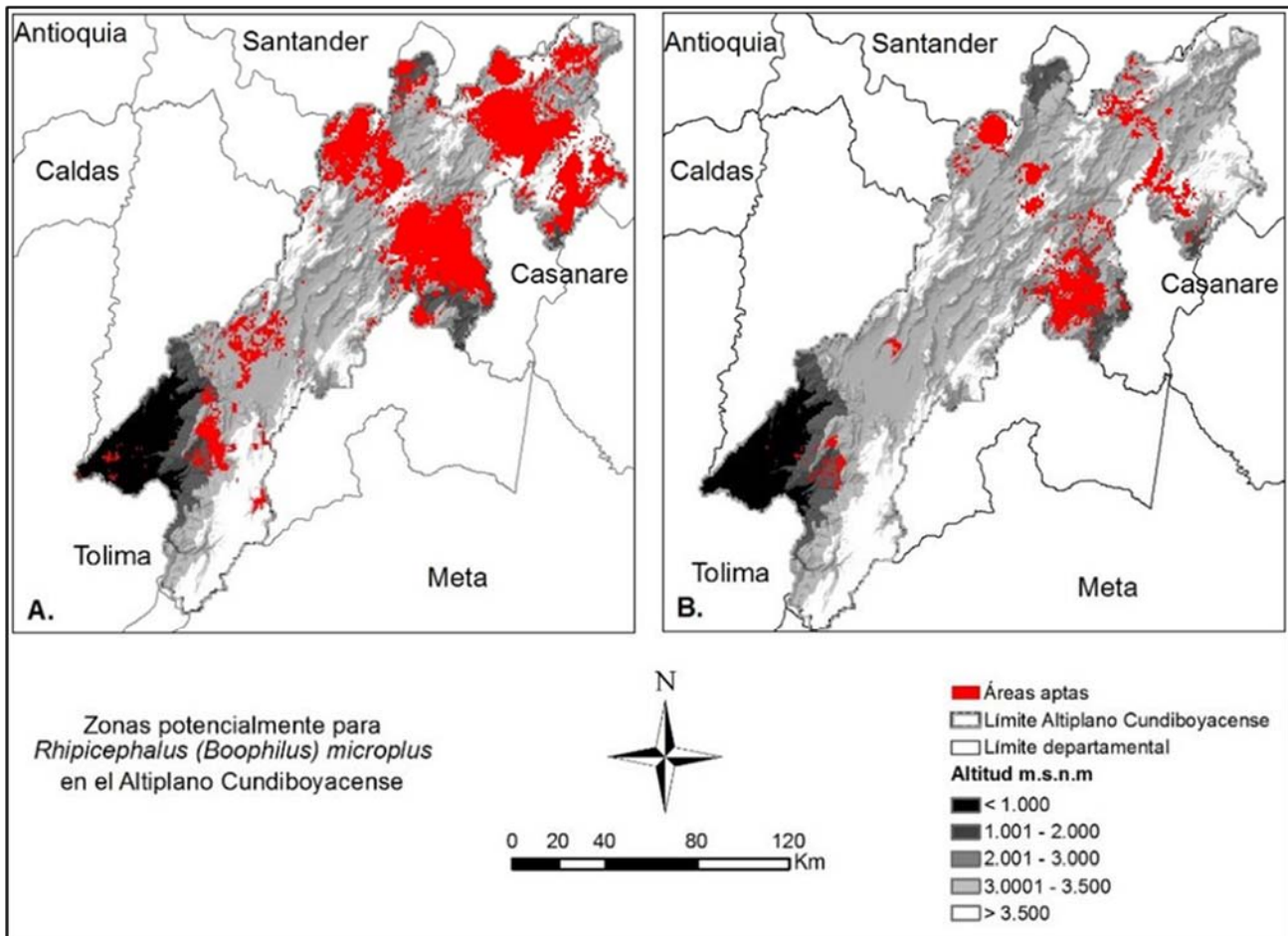


Figura 16. Modelo de distribución y áreas potencialmente aptas para la garrapata común del ganado *Rhipicephalus Boophilus microplus* en el Altiplano Cundiboyacense, generado con: A. Maxent y B. árboles de clasificación.

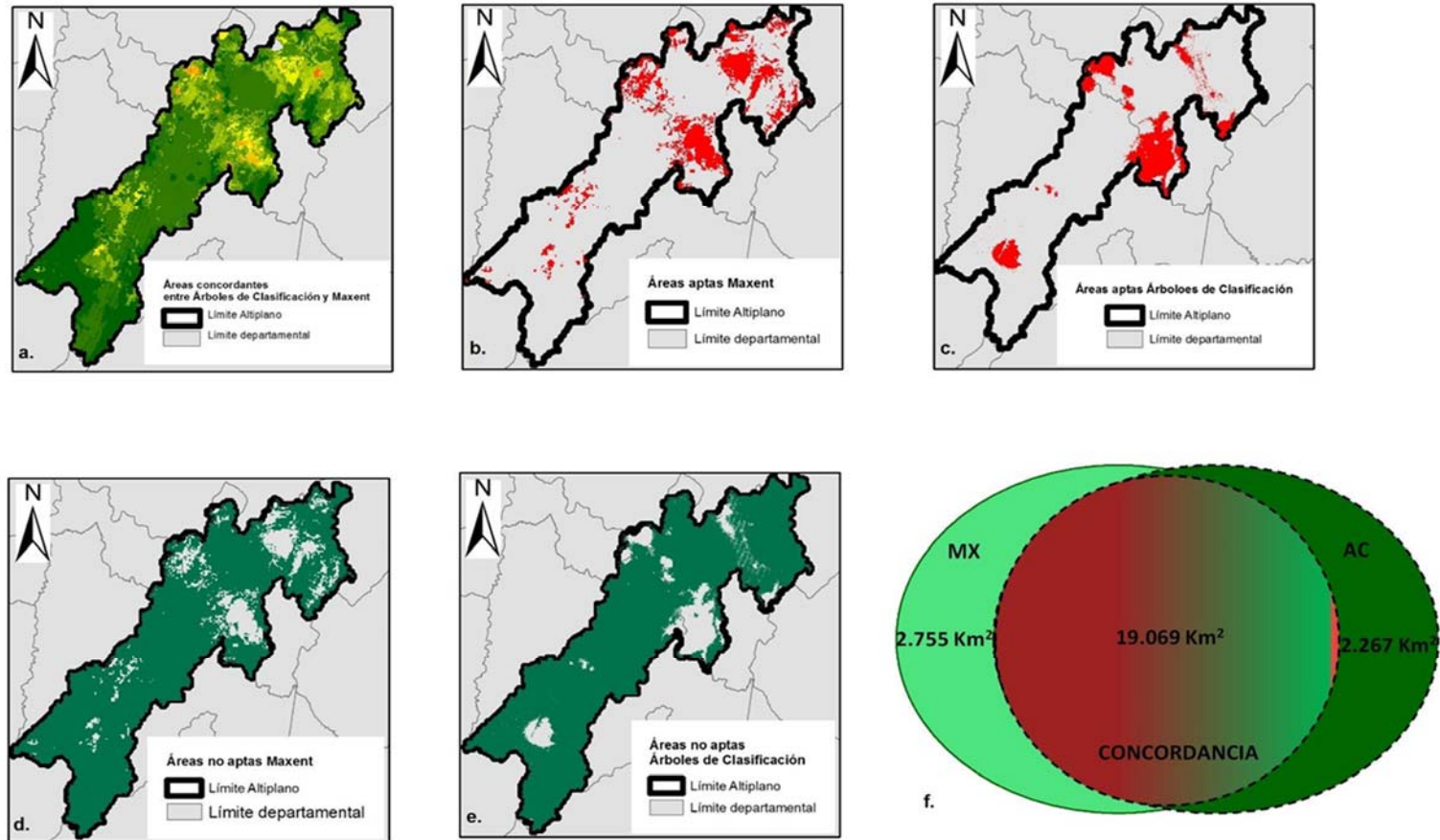


Figura 17. Concordancia de áreas de predicción generada por los dos métodos de modelamiento utilizados. a. Área concordantes entre Maxent y árboles de clasificación; b. Áreas aptas proyectadas por Maxent; c. Áreas aptas proyectadas por los árboles de clasificación; d. Áreas no aptas para Maxent; e. Áreas no aptas para árboles de clasificación. MX: Maxent. AC: árboles de clasificación.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Más allá de estimar y verificar cual es el mejor de los dos métodos, lo que se pretende con este análisis es hacer una interpretación complementaria donde se pueda aprovechar la fortaleza de cada una de las herramientas, es decir, la predicción utilizando ausencias por los árboles y las áreas potencialmente aptas menos conservadoras generadas por Maxent (Figura 18), de tal manera que la identificación de las áreas potenciales de distribución de la garrapata en el Altiplano sea más robusta y consistente. No obstante, se presentan los resultados para cada una de las herramientas, junto con la evaluación de rendimiento de los dos modelos, como respaldo del análisis estadístico de este estudio.

Modelación a partir de Maxent

El modelo generado en Maxent, se ajustó a los datos de entrenamiento utilizados presentando un AUC= 0,918 y una tasa de entrenamiento de omisión de 0,04, indicando que los errores de omisión fueron mínimos, lo cual asume un buen ajuste del modelo resultante. Cabe anotar que para este caso el AUC no explica propiamente el rendimiento y efectividad del modelo, ya que no se utilizaron datos para la evaluación, por lo tanto, lo que estaría explicando es la proporción de los puntos de distribución con respecto a la superficie de modelamiento. De otro lado, las áreas ambientalmente adecuadas se presentaron principalmente hacia la zona norte de la región del altiplano (Figura 4A), donde se encuentran la mayoría de puntos de ocurrencia de la garrapata utilizados para generar el modelo.

Las variables que más aportaron a la construcción del modelo de distribución de Maxent, fueron las coberturas de uso de suelo, la precipitación del segundo trimestre húmedo (PP_SON: septiembre – octubre - noviembre), seguido de la temperatura máxima y humedad relativa del primer trimestre seco (Tmax_DJF, H_DJF: diciembre – enero - febrero); la suma de estas cuatro variables supera el 50 % de contribución al modelo, lo que las convierte en las más importantes para Maxent (Figura 7a), esta condición no determina si son limitantes o favorables para el establecimiento de *R. (B) microplus* en la región, pero sí un acercamiento a los factores ambientales que están influyendo en la distribución de esta especie.

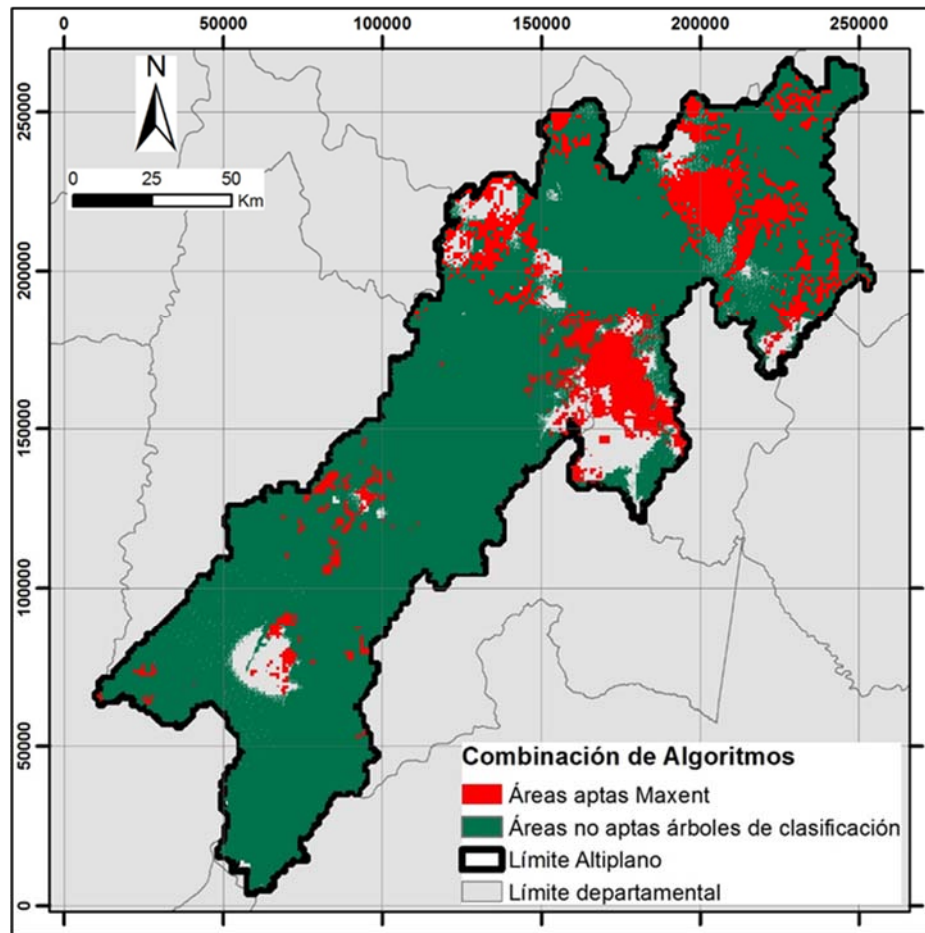


Figura 18. Combinación de áreas proyectadas de acuerdo al enfoque de cada algoritmo. Se presentan las áreas aptas proyectadas por Maxent en rojo, y las áreas proyectadas como no aptas por Árboles de clasificación.

Modelación a partir Árboles de clasificación (*Random Forest*)

Los árboles de clasificación identificaron a las coberturas de usos de suelo, seguida de la altitud, los bovinos, la precipitación del segundo trimestre húmedo (PP_SON: septiembre – octubre - noviembre) y del segundo trimestre seco (PP_JJA: junio – julio - agosto), la temperatura máxima del primer trimestre seco (Tmax_DJF, diciembre, enero, febrero) la temperatura mínima del segundo trimestre seco (Tmin_JJA, junio, julio, agosto), como las variables que más aportaron al modelo de acuerdo al rankin de importancia; estas variables contribuyen en la construcción del modelo en un 50 % lo que las convierte en las más importantes para esta metodología (Figura 19b). El error de omisión fue del 4,6% mientras

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

que el error de comisión fue del 18,1 %, y el error medio es de 11,39 %, sugiriendo un buen ajuste de los datos a la generación de los árboles de clasificación. Al igual que en Maxent, se observa que la mayor probabilidad de áreas potencialmente aptas para *R (B) microplus* se encuentran hacia el norte de la región, aunque más ajustadas en extensión de área (Figura 16B, 17c, 17f).

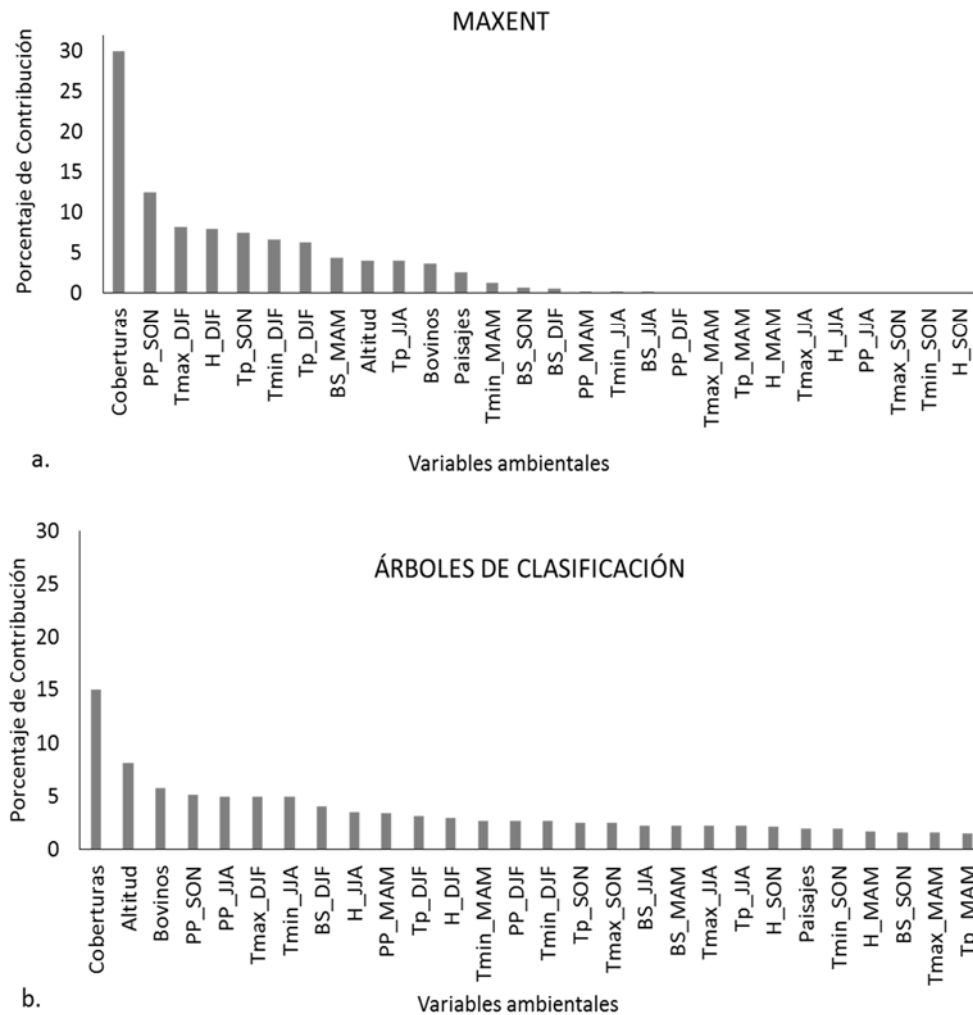


Figura 19. Porcentaje de contribución de las variables predictivas utilizadas, en el modelo de distribución de *R (B) microplus* para el Altiplano Cundiboyacense. **a.** Porcentajes de contribución de las variables en Maxent mediante el método de Jackknife; **b.** Porcentajes de contribución de las variables ambientales en *Random Forest* mediante el índice de Gini. Para Maxent, las dos primeras variables que más contribuyen son Coberturas, Precipitación del segundo trimestre húmedo (SON: Septiembre, octubre, noviembre). Mientras que para Random Forest, las dos variables que más contribuyen son Coberturas y Altitud.

Evaluación del desempeño y de los algoritmos

Vale la pena mencionar que los resultados de los algoritmos para este tipo de modelamiento dependen de la información disponible del grupo biológico a evaluar y por lo tanto los espacios de inferencia o predicción están sujetos a la información empírica y la superficie de predicción que el investigador determine. De acuerdo a este planteamiento, hay que tener en cuenta que Maxent predice áreas de distribución potencial más amplias basado en presencias y pseudo-ausencias generadas por el mismo algoritmo, fuera de la amplitud de las variables predictoras donde ocurre la garrapata (presencias). Este modelo identificó áreas potenciales en la región donde aún no habita *R. (B) microplus* pero que en algún momento podría llegar a habitar, ya que son nichos potenciales para esta especie con condiciones ambientales idóneas para su establecimiento, muy importante para este trabajo ya que lo que se busca es identificar las áreas donde podría establecerse, para generar y fortalecer programas de monitoreo y control de esta garrapata.

De otro lado, los Árboles de Clasificación por *Random Forest* predicen un área menor y más ajustada con respecto a Maxent, restringiendo el nicho donde se halla la especie, pero, ratifica la certeza de predicción en términos de la localización de las áreas para los dos modelos.

Los resultados de la evaluación de curvas AUC indican que las predicciones generadas por Maxent son menos conservadoras con respecto a los árboles de clasificación. En la Figura 20 (A.1 y B.1) se observa que el rendimiento de Maxent con respecto a la identificación de los falsos positivos es de 0,70, mientras que los árboles de clasificación alcanzan el máximo valor de rendimiento 0,90; por otro lado, la estimación de la precisión de las predicciones mediante la prueba de bondad de ajuste, indica que la máxima precisión en los árboles de clasificación 0,90, mientras que Maxent no supera el 0,70 (Figura 20.A. 2 y B.2). Maxent en general identifica sitios con mayor oportunidad a falsos positivos que el árbol de clasificación, produciendo probabilidades de ocurrencia altas donde no ha sido registrada la garrapata. El corte para decidir las áreas óptimas en Maxent de 0,6, mientras que para los árboles de clasificación es de 0,5 (Figura 20. A.4 y B.4).

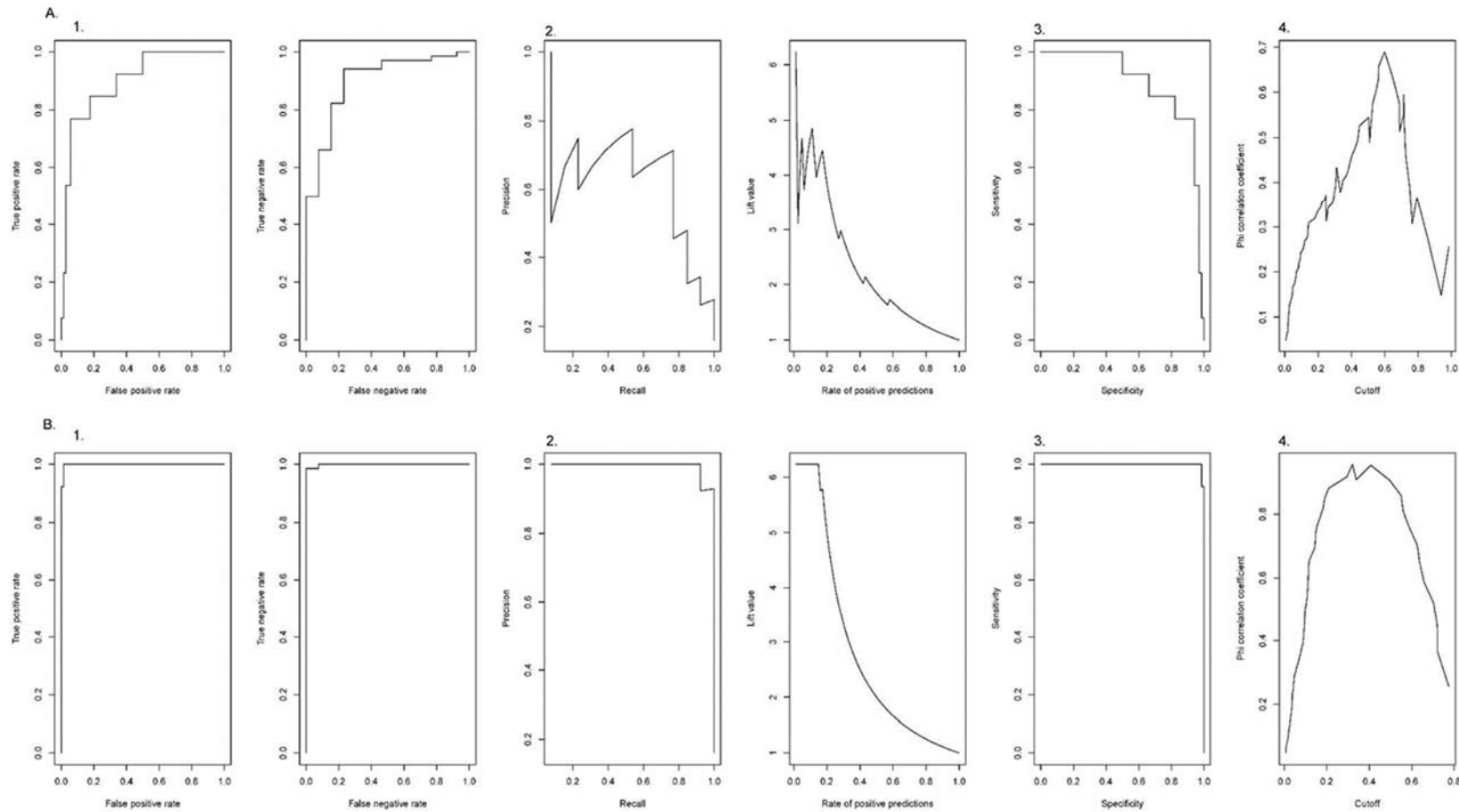


Figura 20. Análisis comparativos del rendimiento de Maxent y árboles de clasificación, mediante el análisis del área bajo la curva (AUC) y correlaciones de Pearson. A. Maxent; B. árboles de clasificación. 1. AUC; 2. Pruebas de bondad de ajuste; 3. Sensibilidad y especificidad; 4. Coeficiente de correlación de Pearson.

2.4. DISCUSIÓN

La variable coberturas de uso de suelo, fue una de las que mayor peso tuvo en la construcción de los dos modelos (Figura 19a y 19b); la región del Altiplano, cuenta con una proporción significativa de usos que contienen algún tipo de cobertura arbórea como los mosaicos compuestos por pastos, cultivos y/o bosques. Este atributo favorece el desarrollo de estados de vida libre de *R. (B) microplus* (Teel *et al.* 1997), ya que permite mantener condiciones favorables de humedad, temperatura y protección para estos estados, lo cual, junto a la presencia del ganado en la región puede contribuir al éxito del desarrollo de esta garrapata en las áreas aptas generadas por los modelos. Sin embargo, esta región también contiene grandes extensiones de pastos y áreas abiertas que más que ser un factor favorable para el establecimiento de esta garrapata se convierte en una limitante. Por otro lado, no hay que perder de perspectiva, que la distribución y el establecimiento de las especies no dependen de un único factor, por lo que el análisis de las variables climáticas, junto con las de altitud y hospedero, como se hace a continuación complementa este componente del paisaje.

Variables como la altitud junto con la densidad de bovinos (número de cabezas de ganado por ha), siguieron en importancia a las coberturas en la modelación con árboles de clasificación, no siendo así para Maxent, que les dio más peso a las variables climáticas,

como la precipitación del segundo trimestre más húmedo (PP_SON), la temperatura máxima del primer trimestre seco (Tmax_DJF) y la Humedad relativa del primer trimestre seco (H_DJF), (Figura 7a, 4b). El desarrollo del ciclo de vida de este parásito requiere de dos factores fundamentales, el primero se relaciona con las condiciones climáticas, ya que están directamente relacionadas con el desarrollo de los estados de vida libre (teleogina, huevos, y larvas en busca de hospedero); el segundo factor es la presencia de su hospedero, para culminar su ciclo de desarrollo (larva, ninfa, adultos), condiciones que determinan su establecimiento, y que de acuerdo a lo planteado por Estrada – Peña *et al.* (2006), la presencia del ganado no es suficiente para el establecimiento, siendo la temperatura ambiental y la precipitación las variables más determinantes los estados de vida libre, lo cual se valida con los resultados obtenidos en este trabajo.

Las condiciones climáticas del Altiplano no son las más favorables para el desarrollo de *R. (B) microplus*, ya que esta región presenta bajas temperaturas, con valores promedio entre los 12°C – 16°C, y temperaturas mínimas diarias de 6°C o menores, lo cual afecta el proceso

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

de preoviposición y oviposición, así como el de eclosión, retardándolos o inhibiendo alguno de ellos, ya que no se presentarían las condiciones ideales para la acumulación de grados días o semana requeridos para el éxito de estas fases.

De otra parte, la humedad se relaciona con el éxito o fracaso del establecimiento de esta garrapata, ya que el exceso o déficit de esta variable afecta los huevos ovipositados, puesto que requieren de condiciones favorables de humedad (alta humedad), para mantenerse sanos y tener éxito en el proceso de eclosión. La humedad del Altiplano tiende a mantenerse en los límites de la región, es decir en las zonas laterales occidentales y orientales (Figura 2a y 2b), esta condición, contribuye a explicar la localización de las áreas aptas resultantes del modelamiento, ya que se ubican principalmente en la zona Nor-oriental y un segmento en la zona Nor-occidental, del Altiplano Cundiboyacense (Figura 16).

De acuerdo a Rojas *et al.* (2010), en el Altiplano la temperatura mínima a pesar de presentar aumentos altamente significativos, también presenta disminuciones importantes; estas condiciones estarían afectando el establecimiento de *R (B) microplus*, al ser una de las variables ambientales más influyentes en distribución y desarrollo de esta especie (Figura 19a y 19b). Sin embargo, la tendencia al aumento de la temperatura en la región durante los últimos 10 años (Rojas *et al.* 2010), puede ser la condición que favorezca hasta ahora el tímido establecimiento de esta garrapata, teniendo en cuenta además la característica de plasticidad genética y fenotípica que presentan las especies introducidas como *R (B) microplus*.

Vale la pena resaltar que durante el periodo en el que se realizaron los muestreos para registrar *R (B) microplus* en la región, estuvo influenciado por evento climático del Niño el cual afectó tanto la temperatura como a la precipitación, donde los regímenes regulares de precipitación durante el año Niño presentaron probabilidades de reducción entre el 80 – 100% por debajo de su régimen climatológico, principalmente en los trimestres más secos del año, diciembre-enero-febrero y junio-julio-agosto (CORPOICA 2012). Las condiciones cambiantes del clima afectan los ciclos de desarrollo de las especies, lo cual de acuerdo a CORPOICA (2011) muestran que el proceso de incubación de huevos fue el más afectado, reflejándose en largos periodos de eclosión o inclusive en el fracaso de este proceso y por lo tanto en los bajos registros de presencia.

La variable altitud, fue la segunda más importante para los árboles de clasificación, mientras que para Maxent no alcanzó a encontrarse entre las primeras cinco (Figura 19a, 19b).

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Teniendo en cuenta que los árboles de clasificación trabajan con presencias y ausencias junto con variables altamente correlacionadas del clima como la temperatura con la altitud, podría asumirse que tomó esta variable como un factor limitante para el establecimiento ya que los registros de ausencia son superiores a los de presencia, y que a su vez se encontraban en elevaciones superiores a los 2.700 m, fundamentado este aspecto en la relación monotonía de la temperatura con la altitud lo cual validaría la ausencia de la garrapata en estas altas cotas altitudinales. Por otra parte, un factor contrastante es la presencia de esta garrapata en altitudes superiores a los 2.700 m a pesar de las condiciones desfavorables anteriormente expuestas en estas zonas, lo cual puede deberse al movimiento y desplazamiento de sus hospedero el ganado bovino a lo largo del Altiplano asociado a un fenómeno de transformación de áreas de agricultura a ganadería en zonas altas del Altiplano, debido a que las condiciones ambientales son favorables para el establecimiento de las razas de ganado europeas como Holstein motivado a su vez, por un interés de mejorar la economía por parte de los campesinos de la región incursionando en la actividad ganadera (Arias *et al.* 2011, Fedegan 2013).

Aunque no se realizó un análisis específico sobre el movimiento o desplazamiento del hospedero de la garrapata (el ganado bovino), a partir de la localización de las zonas con mayor aptitud climática y ambiental para la presencia y distribución de esta especie, se puede sugerir que el movimiento del ganado entre regiones puede ser factor de riesgo determinante en términos de dispersión de la garrapata a nuevas áreas, lo cual podría estar sucediendo en el Altiplano, principalmente en la zona Norte donde limita con departamentos de la Orinoquia y los Santanderes, regiones que han albergado esta garrapata habitualmente; además, en esta misma zona se encuentra la ciudad de Duitama que es el principal centro de acopio de ganado de la región (Figura 9), donde se despliega un tránsito activo de ganado bovino desde los Llanos Orientales hacia el Altiplano lo cual abre la posibilidad de introducción y establecimiento de *R. (B.) microplus* en esta región, ya que involucra la distribución y el desplazamiento de ganado de zonas bajas a zonas altas, sirviendo de transporte para la garrapata. Además, las larvas de *R. (B.) microplus* pueden ser transportadas en el heno, botas, ropa y otros fómites, desde regiones endémicas para el parásito.

Los resultados de este trabajo, evidencian la necesidad de desarrollar una estrategia de monitoreo, control y seguimiento, del ganado que está entrando al Altiplano por estas áreas (Cotrino *et al.* 2007), ya que estas podrían funcionar como un foco de dispersión en el

sistema; sin embargo, habría que profundizar más al respecto con otras técnicas de modelamiento, ya que con el modelamiento de nicho ecológico no se puede explicar más allá de la presencia o ausencia potencial.

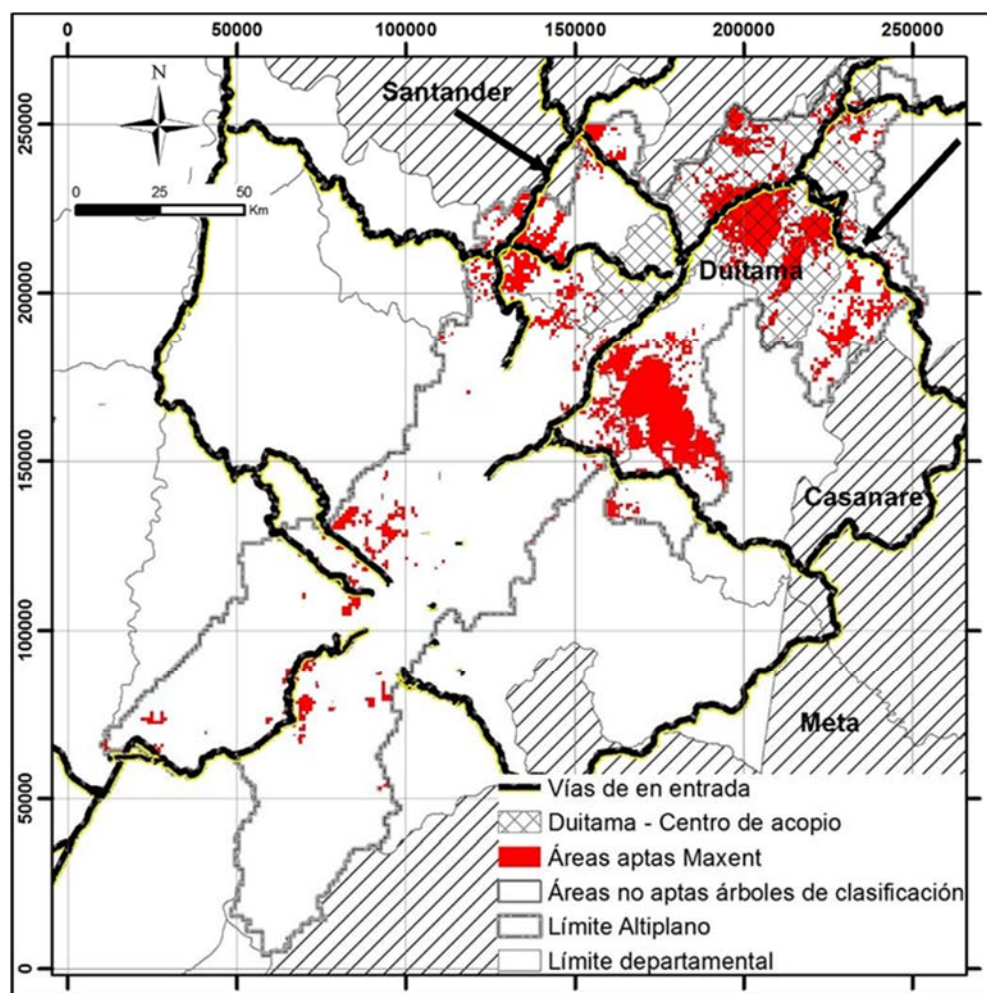


Figura 21. Zonas potenciales de entrada de los bovinos al Altiplano y centro de acopio dentro de la región. Se incluyen las carreteras y los departamentos de origen con el fin de evidenciar las rutas de acceso a la región. Las flechas indican las principales puertas de entrada hacia el centro de acopio más grande de la región. Fuente de carreteras: Ministerio de Transporte – IGAC 2006.

La escasez de reportes sobre *R (B) microplus* en el Altiplano Cundiboyacense y en otros Altiplanos del país, así como el poco conocimiento acerca del comportamiento biológico de *R (B) microplus* en estas regiones, obedece a que sus condiciones climáticas y fisiográficas habían sido establecidas como poco favorables y descartaban la posibilidad de presencia

de esta especie en altitudes superiores a los 2.400 m de altitud (Evans 1978) por lo tanto, no se esperaba encontrarla en regiones con estas características y no se había visto la necesidad de realizar estudios sobre el tema en estas regiones. Sin embargo, las variaciones del clima en las últimas décadas han evidenciado que el aumento de la temperatura conlleva al desplazamiento, ampliación y nuevas distribuciones de especies plaga y especies introducidas como es el caso de esta garrapata, que ya se encuentra en altitudes superiores a las establecidas por Evans (1978). Lo anterior se hace evidente desde los insumos utilizados en este trabajo, ya que en los muestreos realizados en este estudio se registraron presencias en zonas de hasta 2.750 m de altitud (Figura 3), donde no solo se observó la presencia del adulto en el hospedero, si no el desarrollo de fases de vida libre (teleoginas, huevos y larvas), de donde se podría deducir que esta garrapata está superando las barreras ambientales y geográficas y podría estar en una fase de introducción avanzada. Lo anterior puede atribuirse a que las condiciones ambientales pueden estar modificándose debido a las alteraciones en clima en las últimas décadas.

2.5. CONCLUSIONES

La combinación de variables de diferente naturaleza: biológica, fisiográfica, topográfica y climática, utilizadas en este tipo de modelamiento estático de corte fenomenológico que asume los procesos ecológicos y biológicos como supuestos, fortaleció la identificación de las áreas aptas generadas en este trabajo, identificando las variables más importantes en la construcción del modelo y por ende las que están influyendo en la distribución de *R. (B) microplus* en la región. Así mismo, el uso y enfoque complementario de las dos herramientas utilizadas, permitió fortalecer los resultados obtenidos, mediante el aprovechamiento no solo de las presencias con Maxent, sino que también, de las ausencias verdaderas con los árboles de clasificación; dando lugar a las siguientes conclusiones:

La variable más importante para las dos metodologías fue la de coberturas de usos suelo, aunque no es explícito en estos modelos saber si las variables presentan condiciones limitantes o favorables, a partir de los requerimientos ecológicos de esta especie, se podría plantear que de acuerdo a la localización de las áreas aptas esta variable presenta una

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

condición favorable para *R. (B.) microplus* en la región, ya que las áreas resultantes como aptas se encuentran localizadas en usos asociados a los hábitats favorables en términos de cobertura arbórea de acuerdo a lo planteado por Teel *et al.* (1984), donde cabe recordar que las áreas con algún tipo cobertura arbórea contienen condiciones de temperatura y humedad favorables para el desarrollo de los estados de vida libre de esta especie. En este mismo sentido, se observa que las áreas aptas se encuentran ubicadas en mosaicos de pastos con espacios naturales, bosques, arbustales, mosaicos de cultivos con espacios naturales y pequeñas áreas de pastos limpios (Figura 22).

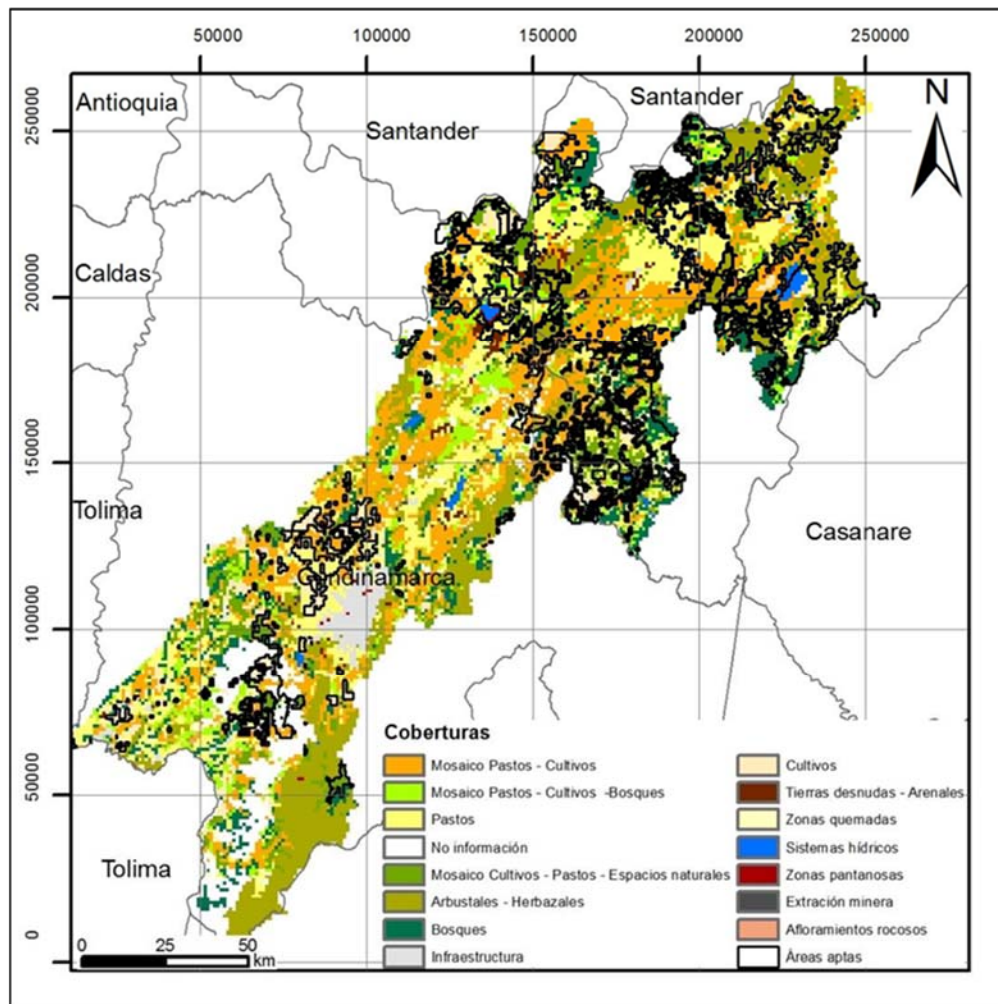


Figura 22. Zonas aptas Vs. Coberturas de uso de suelo. Se observa que la localización de las áreas aptas coincide con coberturas de uso de suelo que presentan condiciones favorables para el desarrollo de estados de fase de vida libre, como los mosaicos de pastos y áreas naturales, cultivos y áreas naturales, bosques y arbustales.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

La influencia de la temperatura también identificada como una de las variables más importantes en los modelos, puede interpretarse en dos sentidos. i. favorable dado por la temperatura máxima del primer trimestre seco, ya que esta, puede estar aportando en la acumulación de grados para el desarrollo de los estados de vida libre, y sus valores se encuentra dentro de los rangos óptimos para desarrollo de los de esta fase no parasitaria 22°C y los 30°C. ii. desfavorable, dado por la temperatura mínima del primer trimestre seco, ya que sus valores descienden de tal manera que presentan valores inferiores al umbral mínimo que soporta esta especie 12°C llegando a los 6°C e inclusive menores.

La precipitación, al igual que la temperatura, influye en dos sentidos: i. favorabilidad, dada por condiciones de línea base, principalmente hacia las zonas nororientales y noroccidentales ya que allí se acumulan los mayores valores de precipitación lo cual está relacionado con condiciones de alta humedad, circunstancia que se asocia al éxito del desarrollo y sobrevivencia de los estados de vida libre de *R (B) microplus*. ii. desfavorabilidad, dada por la característica de “isla seca” del altiplano, ya que, al parecer esta particularidad de la región, pudo tener influencia en las zonas centrales puesto que allí no se registraron áreas aptas para la distribución de *R (B) microplus*.

Se ratificó la aptitud ambiental de las áreas ya muestreadas, y se identificaron áreas nuevas potencialmente aptas en el altiplano para el establecimiento de *R (B) microplus*, con una extensión aproximada de 396 km², con valores significativos de predicción: AUC (0,70 Maxent y 0,90 árboles de clasificación), y bajos valores de errores omisión (0,04 % Maxent y 4,6 % árboles de clasificación).

Se sugiere complementar estos modelos con análisis de clima futuro, previendo el efecto del cambio climático sobre su distribución, tomando como base el trabajo ya desarrollado por CORPOICA (2011), donde según los análisis exploratorios realizados se observó que hacia el 2020 aumentarán las áreas de distribución de *R (B) microplus* en Cundinamarca y Boyacá.

El uso de las dos técnicas utilizadas, funcionaron por un lado para evaluar la *Sensibilidad* con el caso de MAXENT teniendo en cuenta su fortaleza y enfoque para construir el modelo a partir de presencias; mientras que los Árboles de Clasificación funcionaron para la

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Especificidad, valiéndonos de su fortaleza y enfoque en el uso de las ausencias (además de las presencias), para construir el modelo.

2.6. BIBLIOGRAFÍA

- Arias, J. J., A. Betancourt., C. E. Valencia y H. Sardi. 1991. Identificación de Garrapatas de Bovinos en el municipio de Tumaco (Colombia). *Revista ICA* 26: 145-151.
- Arias, M., D. Bocarejo., I. Ibáñez., C. Jaramillo., M. Fernández y J. Kisner. 2011. Cuando el crecimiento viene de afuera: dinámicas territoriales en Susa y Simijaca. Documento de Trabajo N° 68. Programa Dinámicas Territoriales Rurales. Rimisp, Santiago, Chile. 46 pp.
- Betancourt, J. A., O. García., L. Roqueme y M. Navarrete. 1992. Distribución y Niveles de infestación por garrapatas en bovinos de Córdoba, noreste de Sucre y noreste de Antioquia. *Revista IC*. 27: 63-73.
- Bowman, A. y Nuttall, P.A. (Eds). 2008. Ticks. Biology, Disease and Control. Cambridge University Press. 492 pp.
- CORPOICA y Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2002. Zonificación Agroecológica de Colombia. Bogotá D.C., 289 pp.
- CORPOICA 2008. Formulación proyecto “Modelización del efecto del cambio climático sobre la distribución de la garrapata *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* en el trópico alto colombiano. C.I. Tibaitata. Mosquera, Cundinamarca., 61pp.
- CORPOICA 2011. Modelización del efecto del cambio climático sobre la distribución de la garrapata *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* en el trópico alto colombiano. Informe técnico final. C.I. Tibaitata. Mosquera, Cundinamarca. 87 pp.
- CORPOICA 2012. Plan para el manejo de los impactos en el sector agropecuario ocasionados por la emergencia Invernal. C.I. Tibaitata. Km 14 Vía Mosquera. 341 pp.
- Cortés – Vecino, J.A., J.A. Betancourt Echeverri., J. J, Arguelles – Cárdenas y L.A. Pulido – Herrera. 2010. Distribución de garrapatas *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* en bovinos y fincas del Altiplano Cundiboyacense (Colombia). *Revista CORPOICA - Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 11(1): 73-8.
- Cotrino, B.V., B.C. Gaviria y E. Espíndola. 2007. La babesiosis en bovinos: una amenaza para la ganadería del altiplano. Bogotá: Laboratorio Médico Veterinario, Ltda. Bogotá D.C., 4pp.

- De Blas, N., C. Ortega., K. Frankena., J. Noordhuizen y M. Thrusfield. 2000. Win Episcope 2.0. A software for quantitative veterinary epidemiology. Red Ratio - Epidecon. Facultad de Veterinaria, Universidad de Zaragoza, España; Agricultural University, Wageningen, Netherlands; University of Utrecht, Netherlands & University of Edinburgh, United Kingdom. (<http://www.clive.ed.ac.uk/winepiscope/>).
- De Campos Pereira, M., M. Bahia- Labruna., M.P. J. Szabó y G. Marcondes-Klape. 2008. *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* Biología, controle e resistência. MedVet Livros, São Paulo, Br., 169 pp.
- Elith, J., S.J. Phillips, H. Trevor, M. Dudik, Y.E. Chee y C.J. Yates. 2011. A statistical explanation of Maxent for ecologists, *Diversity and Distributions* 17: 43 –57.
- Estrada-Peña, A. 1999. Geostatistics and remote sensing using NOAA-AVHRR satellite imagery as predictive tools in tick distribution and habitat suitability estimations for *Boophilus microplus* (Acari: Ixodidae) in South America. *Veterinary Parasitology* 81: 73 – 82.
- Estrada-Peña, A. 2001. Climate warming and changes in habitat suitability for *Boophilus microplus* (Acari: Ixodidae) in Central America. *Journal of Parasitology* 87(5): 978-987.
- Estrada-Peña, A., C. Sánchez- Acedo., J. Quílez y E. Del Cacho. 2005. A retrospective study of climatic suitability for the tick *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* in the Americas. *Global Ecology and Biogeography* 14: 565–573.
- Estrada-Peña, A., M. Corson., J.M.Venzal., A.J. Mangold y A. Guglielmonte. 2006. Changes in climate and habitat suitability for the cattle tick *Boophilus microplus* in its southern Neotropical distribution range. *Journal Vector Ecology* 31(1): 158 – 167.
- Evans, D.E. 1978. Ph.D. Thesis. Cnaa/NE London Polytechnic (now Life Science Department, University of East London). United Kingdom. 283 pp.
- FAO (1984). Tick and Tick Borne Diseases Control: A Practical Field Manual. Volumen I Tick control. Rome., 299pp.
- Federación Colombiana de Ganaderos – FEDEGAN. 2013. Análisis del Inventario Ganadero Colombiano – 2013, Comportamiento y variables explicativas. Bogotá. Bogotá. D.C., 37 pp.
- Guglielmonte, A. 1995. Epidemiology of Babesiosis and Anaplasmosis in South and Central America. *Veterinary Parasitology* 57(1-3): 109-119.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

- Hernandez P. A., Franke. I., Herzog. S.K., Pacheco. V., Paniagua. L., Quintana. L., Soto. A., Swenson. J.J., Tovar. C., Valqui. T.H., Vargas. J. y Young. B.E. 2008. Predicting species distributions in poorly-studied landscapes. *Biodivers Conserv.* 17: 1353-1366.
- IDEAM, IGAC, SINCHI, IAvH, INVEMAR; CORMAGDALENA y UAESPNN. 2002. Mapa de coberturas de la tierra, línea base (2000 - 2002), metodología CORINE Land Cover (escala 1:100.000). Bogotá. D.C.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC. 2004. Adopción del Marco Geocéntrico Nacional de Referencia *MAGNA-SIRGAS* como datum oficial de Colombia. Bogotá. D.C., 31pp.
- Liaw, A. y M. Wiener 2002. Classification and Regression by randomForest. *R News* 2 (3): 18--22.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). 2006. Número de Cabezas de Ganado para cebsa integral, lechería y doble propósito. Disponible en: <http://sigotn.igac.gov.co/sigotn/reporteMapaNuevo.aspx?prmAlls=217%3b7%3b2006%3b1%3b0%3b0%3b390575%3bCabezas+Bovinos%3b>. Consultado en Marzo de 2014.
- Ortiz, R.D. 2004. Costos de las estrategias de medicina veterinaria preventiva en ganaderías de leche del cordón lechero de Boyacá. Tesis de Pregrado en Medicina Veterinaria y zootecnia. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (UDCA), Bogotá D.C., 67-69 pp.
- Pearman, P.B., A. Guisan, O. Broennimann y C. F. Randin. 2008. Niche dynamics in space and time. *Trends in Ecology and Evolution* 23 (3): 149 – 158.
- Pereira, M y Labruna, M. (2008). *Rhipicephalus (Boophilus) microplus*. En: Pereira, M.C.; Labruna, M.B.; Szabó, M.P.J.; Klafke, G.M. (Eds.), *Rhipicephalus (Boophilus) microplus*. Biologia, Controle e Resistência. São Paulo.
- Phillips. S.J., R.P. Anderson y E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231–259.
- Phillips, S. J. y M. Dudik. 2008. Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31: 161–175
- R Core Team. 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.

- Rivera, O.D. 2004. Altiplanos de Colombia. Altiplanos de la cordillera oriental, Altiplano Cundiboyacense 59 – 107 pp.
- Rodríguez-Eraso N., J.D. Pabón-Caicedo., N.R. Bernal-Suárez y J. Martínez-Collantes. 2010. Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Universidad Nacional de Colombia y Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación. Bogotá, D. C., Colombia. 80 pp.
- Rojas, E., B. Arce., A. Peña., F. Boshell y M. Ayarza. 2010. Cuantificación e interpolación de Tendencias locales de temperatura y precipitación en zonas alto andinas de Cundinamarca y Boyacá (Colombia). *Revista CORPOICA - Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 11 (2): 173-182
- Sing, T. O. Sander O., N., Beerenwinkel y T. Lengauer. 2005. "ROCR: visualizing classifier performance in R." *Bioinformatics*, 21(20), pp. 7881. <URL: <http://rocr.bioinf.mpi-sb.mpg.de>>.
- Solís, S. S. 1991. Ecología de las garrapatas *Boophilus*; perspectivas de un panorama. p. 19-30. En: Memorias del II Seminario Internacional de Parasitología Animal. Garrapatas y enfermedades que transmiten. Morelos, Mexico.
- Strobl, C., J. Malley. y G. Tutz. 2009. An Introduction to Recursive Partitioning: Rational, Application, and Characteristics of Classification and Regression trees, Bagging, and Random Forest. *Psychological Methods* 14(4): 323-348.
- Sutherst, R.W. 1987. Ticks and tick-borne diseases: proceedings of an international workshop on the ecology of ticks and epidemiology of tick – borne diseases, held at Nyanga, Zimbabwe, *Aciar Proceedings*. No.17. 159p.
- Taylor, M. M.A. Coop y R.L. Wall. 2007. *Veterinary Parasitology*. Third edition. Blackwell Publishing. London, UK., 697 pp.
- Teel, P.D., S. Marin., W.E. Grant y J.W. Stuth. 1997. Simulation of host – parasite – landscape interactions: influence of season and habitat on cattle feces tick (*Boophilus* sp.) population dynamics in rotational grazing system. *Ecological Modelling* 97: 87 – 97.
- Velandia, F. 2005. Interpretación de transcurencia de las Fallas Soapaga y Boyacá a partir de Imágenes landsat TM. INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGIA Y MINERIA, INGEOMINAS. Bogotá D.C., 20pp.

3. FACTORES REGULADORES DE LA GARRAPATA COMÚN DEL GANADO PARA EL ALTIPLANO CUNDIBOYACENSE: SIMULACIÓN DE LA DINÁMICA POBLACIONAL DE LA GARRAPATA DEL GANADO RHIPICEPHALUS (BOOPHILUS) MICROPLUS

Resumen

Se presentan los resultados de las simulaciones de la garrapata común del ganado *Rhipicephalus Boophilus microplus*, para un periodo de 16 años en el Altiplano Cundiboyacense, con el fin de evaluar los efectos del clima, el paisaje, y la densidad del hospedero de la región, sobre las tasas de mortalidad y sobrevivencia de los diferentes estados de desarrollo del ciclo de vida de la garrapata. Se identificaron a la temperatura y la precipitación como las variables que determinan el establecimiento de *Rhipicephalus Boophilus microplus* en la región de estudio, donde el aumento de la temperatura influye en el aumento de las poblaciones, mientras que el aumento de la precipitación influye en la reducción de las poblaciones. Se evidencio que las poblaciones presentan sus picos de población en los trimestres húmedos y descienden en los trimestres secos.

Los resultados de las simulaciones bajo escenarios futuros de temperatura y precipitación, apuntan a que el cambio climático no es favorable para el desarrollo de esta especie en años futuros, ya que las poblaciones tienen a disminuir con las proyecciones de aumento de temperatura y precipitación generadas para la región por el IDEAM.

Palabras clave: Modelos dinámicos, ectoparásitos, dinámica de población, parasito-hospedero

3.1. INTRODUCCIÓN

Las garrapatas se establecen como el grupo de ectoparásitos más importante del ganado bovino en Colombia (Betancourt *et al.* 1992), debido tanto a su condición de parásito, como a los patógenos que transmite y las enfermedades asociadas con ellos. La garrapata común del ganado, denominada así en Colombia, pero también mundialmente conocida como la garrapata de la fiebre del ganado *Rhipicephalus (Boophilus) microplus*, (en adelante *R (B) microplus*), pertenece a la familia Ixodidae que, tiene distribución mundial, con preferencias de zonas bajas y medias para su establecimiento (Betancourt 2004); esta especie, se caracteriza por desarrollar su ciclo de vida en un solo hospedero, por lo tanto requiere grandes ungulados como los bovinos para completar su ciclo. Sin embargo, es posible que en ausencia de su hospedero principal utilice hospederos intermedios como venados o caballos (Teel *et al.* 1996, De Campos Pereira *et al.* 2008). El ciclo de vida de *R (B) microplus* se divide en dos fases: **1. Fase parasitaria**, se identifica por ser el período de hematofagia e inicia cuando las larvas se adhieren al hospedero y termina cuando las teleoginas³ caen al pasto; y **2. Fase no parasitaria** (estados de vida libre), la cual se desarrolla en el ambiente independiente del hospedero y depende directamente de las condiciones ambientales; esta fase incluye los procesos de preoviposición, oviposición, incubación (huevos) y eclosión, termina cuando las van larvas en busca del hospedero (Mount *et al.* 1991, Teel *et al.* 1997, De Campos Pereira *et al.* 2008).

Betancourt (2004), presenta una recopilación bibliográfica que resume los periodos de las fases de ciclo de vida de *R (B) microplus* (Tabla 4). De acuerdo con esta revisión, la fase de estados de vida libre depende de la región y el clima en donde se desarrollan, el cual puede ser de hasta 146 días; para zonas bajas y cálidas este periodo es más corto en comparación con zonas de montaña y frías donde se amplían los periodos para cada estado y proceso de desarrollo, debido a la disminución de la temperatura. Con respecto a la fase

³ **Teleogina** se refiere al estado de la hembra adulta que cumple su ciclo de alimentación sobre el hospedero, es fecundada y se desprende del mismo para empezar el ciclo de oviposición en el ambiente (generalmente pastos). También se les identifica como hembras engordadas

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

parasitaria, su período de duración es de máximo 21 días, independientemente de las condiciones ambientales. En regiones de altas temperaturas como en el Meta, *R (B) microplus* puede producir entre 5.4 y 5.7 generaciones al año, mientras que en condiciones de temperaturas bajas como en las zonas altas del Valle del Cauca, el número de generaciones puede ser menor entre 1 – 2 generaciones al año o ninguna (Evans 1978, Benavides, 1984, Betancourt 2004).

El incremento de registros de la garrapata común del ganado *R (B) microplus* en el Altiplano Cundiboyacense⁴ (Betancourt 2012), sumado al poco conocimiento de su comportamiento y la biología de sus poblaciones en esta nueva área de distribución, justifica realizar estudios que fortalezcan el entendimiento de su biología y ecología en este nuevo hábitat para apoyar las acciones de saneamiento por los efectos causados por esta especie. La información conocida sobre *R (B) microplus* en el Altiplano Cundiboyacense se enfoca principalmente a los estados de vida libre, con evidencias recientes de eclosión en altitudes superiores a los 2500 m, lo cual en años anteriores al 2004 no era viable (Ortiz 2004, Cortés - Vecino *et al.* 2010, CORPOICA 2011, Betancourt 2012). La falta de atención para conocer su comportamiento en estos nuevos ambientes, podría dar origen a graves consecuencias económicas en los sistemas de producción lechera de la región, además de afectar seriamente a los sistemas naturales asociados a los sistemas ganaderos, a causa del manejo inadecuado de acaricidas y otros productos químicos que podrían afectar la biota nativa de la región.

Las simulaciones de dinámicas de población, se enmarcan en los modelos dinámicos de carácter mecánico, se basan en los principios de Realidad y Generalidad de acuerdo a la clasificación de Levins (1966), se denominan fisiológicos o de procesos y basan sus predicciones en la relación causa efecto en un sistema dado; en lugar de realizar predicciones de precisión, realiza correcciones teóricas de la respuesta esperada (Pickett *et al.* 1994, Hannon y Ruth 1997, Guisan y Zimmermann 2000).

Los modelos dinámicos de sistemas ecológicos, son diseñados para comprender y conocer los cambios que se presentan en los patrones de comportamiento de estos sistemas, definidos como crecimiento, caída y oscilación. Para lo cual se generan simulaciones de procesos dinámicos que intentan capturar los cambios a través del tiempo; como el caso

⁴ Región lechera ubicada en el centro de Colombia, ubicada entre los 2500 – 3000 msnm.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

de un modelo dinámico para explicar el comportamiento de oscilación de poblaciones de parásito - hospedero a través del tiempo (Ford 1999, Turner *et al.* 2001, Hannon y Ruth 1997).

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Tabla 4. Resumen de las etapas del ciclo de vida de *R (B) microplus* para diferentes regiones de Colombia (Fuente: Betancourt, 2004).

Departamento	Sitio	Altitud (msnm)	Temperatura Media °C	Periodo de pre- oviposición	Periodo de oviposición	Periodo de incubación	Periodo Adulto - Larva	Supervivencia Larvaria
Córdoba	Turipana	15	29.7	3**	5-10**	21**		
Meta	Carimagua	150 - 175		2-7**	7-12**	14-36**		52-174**
Meta	Carimagua	150 - 175	26				28-35**	32-45**
Meta	Carimagua	150 - 175		2-6**	7-12**	21-28**	27-32**	17-61**
Meta	Carimagua	150 - 175					26-38**	2-6**
Meta	Km 18 vía Puerto López	336	26				A 4.3*	A 10.83*
							B 5.10*	B 11.56*
Tolima	El Guamo	321	28	3-5**	3-6**	22-26**	35-38**	22-38**
Tolima	Ibagué	1285	24	3-6**	3-10**	38-44**	42-47**	33-45**
Antioquia	El Nus	800	24	3-7**	8-22**	23-43**	34-72**	13-186**
		1000	23	< 1 *	1-7*	4 – 7*		
		1700		<1 y 1-2*	4 – 11*	7-13*		
Valle del Cauca	Palmira	2400	--	3 – 4*	4 – 11*	NE		
		2510		3 – 4*	4 – 11*	NE		

La falta de conocimiento del comportamiento de las poblaciones de *R (B) microplus* en regiones de alta montaña y su posible establecimiento y éxito de desarrollo, sustentan la importancia de generar un modelo de dinámica poblacional específico para la región del Altiplano Cundiboyacense. Lo anterior fundamenta el propósito de este estudio: generar un modelo de simulación que permita describir el desarrollo de la dinámica de población de *R (B) microplus* en el Altiplano Cundiboyacense, basado en condiciones locales de clima, paisaje, densidad y resistencia de su hospedero (*Bos Taurus*).

En el presente estudio, se describe el proceso del desarrollo del modelo dinámico y su evaluación, de acuerdo a la propuesta de Grant *et al.* (2001), en el sentido que los modelos de simulación son tanto un método como un resultado. Ya que este estudio corresponde al primer modelo dinámico poblacional que se genera para esta especie en Colombia, esto daría paso ampliar este tipo de estudios a otras regiones del país y apoyar desde la biología, la generación de un plan nacional para el monitoreo seguimiento y control de este parásito, que trae consigo grandes pérdidas en el sector ganadero y ambiental.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1. Área de estudio

El Altiplano Cundiboyacense se ubica en la Cordillera Oriental colombiana desde el páramo de Sumapaz, hasta la base de la Sierra Nevada del Cocuy, en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, cuenta con una extensión aproximada de 19690 km²; comprende altitudes entre los 2000 y 3000 m y tres regiones planas bien diferenciadas, la Sabana de Bogotá, los Valles de Ubaté - Chiquinquirá y los Valles de Duitama - Sogamoso (Figura 23).

La temperatura media oscila entre los 12 y 16°C (Rojas *et al.* 2010). La precipitación presenta una fuerte variación espacial, con valores entre los 1000 mm y los 2000 mm anuales; debido a que la humedad tiende a mantenerse en los bordes, es decir en las zonas occidentales y orientales, como consecuencia de la influencia de los vientos dominantes del este y su condición de altiplano en una cordillera, se le denomina como una “isla seca” (Rodríguez - Eraso *et al.* 2010, CORPOICA 2012).

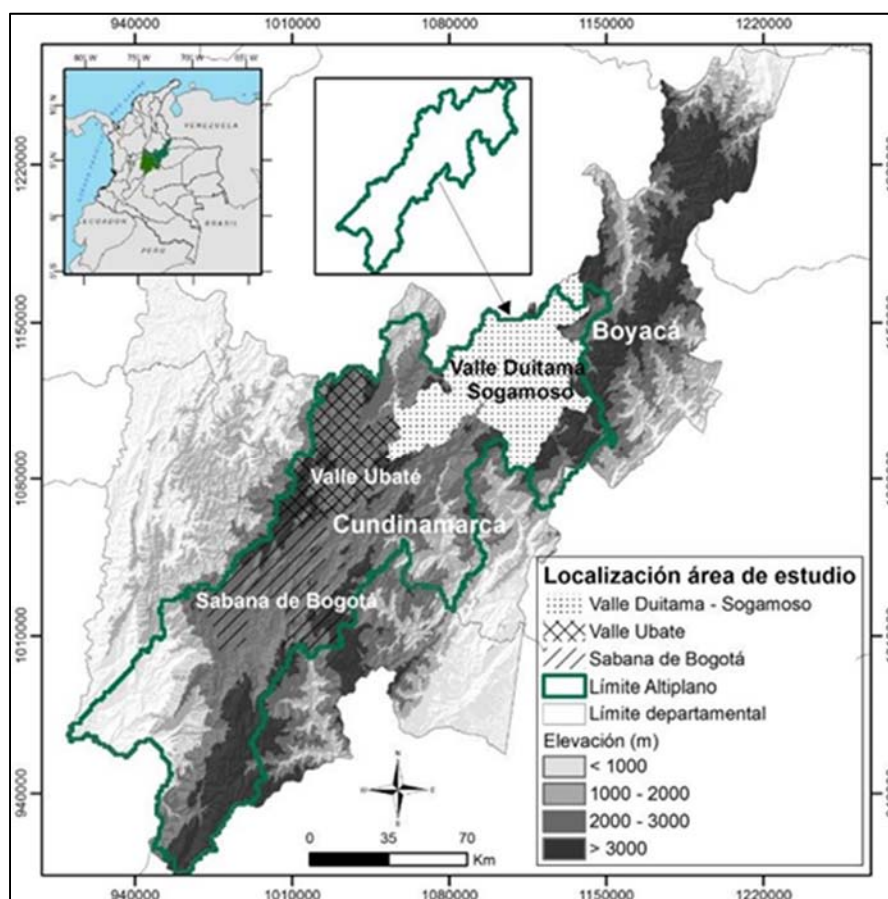


Figura 23. Localización del área de estudio. En verde delimitación del Altiplano Cundiboyacense. Fuente, CORPOICA, 2012.

El principal sistema de producción que domina el paisaje de la región corresponde a la ganadería especializada en la producción de leche (Rivera 2004). Se estima que el Altiplano Cundiboyacense alberga alrededor de un millón de cabezas de ganado del hato ganadero colombiano, se encuentra ubicado en la segunda región con mayor producción lechera del país (Cortés - Vecino *et al.* 2010, Fedegan 2002).

3.2.2. Descripción del Modelo

La estructura metodológica general del modelo se adaptó de Mount *et al.* (1991), con datos ambientales locales de la región de estudio el Altiplano Cundiboyacense, donde se incluyó el paisaje (componente que no es tenido en cuenta por estos autores), así como las

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

variaciones en la temperatura, densidad del bovino, y condiciones del paisaje. El enfoque de este modelo es local, aunque su conceptualización es general y puede adaptarse a otras condiciones ambientales.

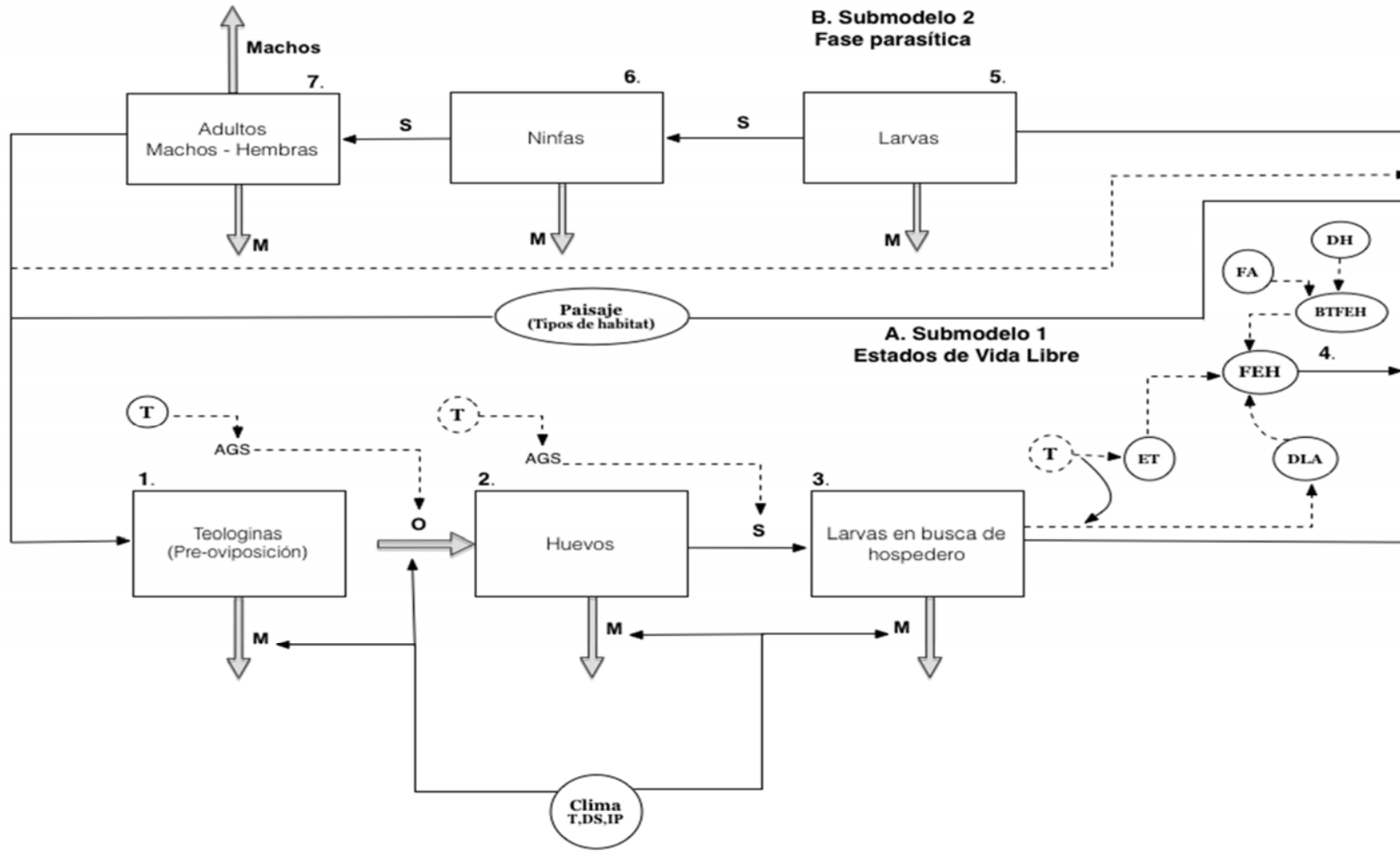


Figura 24. Conceptualización del modelo de dinámica de población para *R(B) microplus*. Adaptado de Mount *et al.* 1991. **AGS**: Acumulación de grados semana; **O**: Oviposición; **S**: Supervivencia; **M**: Mortalidad; **T**: Temperatura; **DS**: Déficit de saturación; **IP**: Índice de precipitación; **ET**: Efecto de la temperatura; **DLA**: Densidad de larvas; **FEH**: Factor de encuentro con el hospedero; **BTFEH**: Base de la tasa del factor de encuentro; **DH**: Densidad de hospedero; **FA**: Factor de ajuste.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

El sistema de interés es la población de *R (B) microplus*, estructurada por las fases de su ciclo de vida (Figura 24), las tasas de mortalidad y sobrevivencia son específicas para cada estado de desarrollo, donde el éxito del establecimiento de esta especie depende tanto de la presencia de su hospedero (bovino) como de condiciones climáticas y de paisaje (Estrada – Peña 2001, Estrada – Peña *et al.* 2005, Teel *et al.* 1996).

El modelo representa los cambios resultantes de la influencia de las variables climáticas (temperatura, índice de precipitación y déficit de saturación); paisaje (bosques y mosaicos con cultivos y/o bosque (áreas óptimas); arbustales, herbazales, mosaico de cultivos con pastos (medianamente óptimas); pastos abiertos y áreas abiertas (desfavorables); densidad y resistencia del hospedero (*Bos taurus*) sobre la dinámica de población de *R (B) microplus*, estructurada por: la densidad poblacional, la fecundidad, tasas de mortalidad y sobrevivencia en un intervalo de tiempo, definido como una semana. El ciclo de vida se dividió en dos fases, con sus respectivos estados de desarrollo (Figura 24); **1. Estados de vida libre**, compuesta por los estados de huevos, larvas en busca de hospedero y Teleoginas o hembras engordadas; el límite de edad para las larvas en busca del hospedero es un acumulado que incluye la sobrevivencia de seis semanas; y **2. Fase parasítica o sobre el hospedero**, compuesta por las larvas que se adhieren al hospedero, ninfas y adultos. Los machos y las hembras se separan durante la transición de ninfa a adulto y se asumen como una relación 1:1; los machos se determinan como un flujo de salida acumulador, pero no con estructura de edad.

Se determinaron dos periodos de sobrevivencia para cada estado, el primero de ellos, definido como el óptimo para el éxito de su desarrollo (Sobrevivencia 1 – S1), mientras que el segundo (Sobrevivencia 2 – S2), es el periodo que, aunque puede continuar vivo el estado, ya no cuenta con el 100% de posibilidades para superar las condiciones ambientales y continuar al siguiente estado del ciclo (Tabla 5).

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Tabla 5. Parámetros para periodos de desarrollo por fase y estado del ciclo de vida de *R (B) microplus*, definidos para el modelo de dinámica de población en el Altiplano. AGS, Acumulación de grados semana. Adaptado de Mount *et al.* 1991.

Fase	Estado	Sobrevivencia 1 (S1)	Sobrevivencia 2 (S2)	AGS °C	Umbral De Desarrollo °C
Teleoginas					
Estados de Vida Libre	Huevos	Cuatro semanas	> cuatro semanas	36	15
	Larvas de vida libre	Seis semanas	> seis Semanas		NA
	Larvas	Una semana			
Sobre el Hospedero	Ninfas	Una semana			
	Adultos	Dos semanas	> dos semanas		
	Teleoginas	Una semana		30	15

3.2.3. Desarrollo del Modelo

El modelo se compone de dos submodelos, que se clasificaron a partir de la denso-dependencia de cada estado, junto con la adherencia al hospedero por parte de las larvas en estado de vida libre. El **submodelo 1** (Fase de vida libre), se estableció a partir de la densidad independiente constituida por los estados de vida libre, establecida a partir de la relación con las variables climáticas y de paisaje, finalizando con la adherencia de las larvas en busca del hospedero determinada por el factor de encuentro (Figura 24.A). El **submodelo 2** (fase parasitaria), se estableció a partir de la densidad dependiente, incluye los estados de la fase parasítica o sobre el hospedero (Figura 24.B). El modelo fue desarrollado utilizando el programa *STELLA*® versión 7.0.1 para Windows (ISEE Systems 1990 - 2001). El intervalo de medida de tiempo se definió semanalmente. Debido a la carencia de experimentos del efecto de variables climáticas y ambientales sobre *R (B) microplus* en la región de estudio, los valores óptimos, y umbrales críticos por encima y por debajo del óptimo, se calcularon con base en ecuaciones cuadráticas descritas en los submodelos 1 y 2 (Anexo 1.1.a, 1.2, 1.3.a, 1.4.a; Anexo 2 a. b. c), utilizando la información ambiental específica del Altiplano Cundiboyacense. Aunque, se realizaron ensayos en

campo con el fin de obtener información primaria y real del ciclo de desarrollo de esta especie, los datos obtenidos no fueron suficientes ni adecuados para poder incluirlos en este modelo de población. Sin embargo, la información funcionó para determinar, si esta especie es capaz de cumplir completa o parcialmente su ciclo de desarrollo en la región.

Submodelo 1: Fase de estados de vida libre

Relación dependiente con las variables climáticas

La dependencia con respecto a las variables climáticas, se estableció mediante ecuaciones cuadráticas (Anexo 1.1.a, 1.2, 1.3.a, 1.4.a), relacionando valores óptimos, y umbrales críticos máximos y mínimos en cada estado de desarrollo, y para cada uno de los periodos de sobrevivencia establecidos (Tabla 5).

Teniendo en cuenta la disponibilidad de información, acerca de la influencia de variables climáticas sobre el desarrollo de las garrapatas, principalmente de subgénero *Boophilus* se identificaron, la temperatura (°C), el déficit de saturación (mm/Hg) y el índice de precipitación (Apéndice 1.1.a, 1.2, 1.3.a, 1.4.a), como las variables climáticas que afectan el desarrollo de las garrapatas en estados de vida libre (Hitchcock 1955, Teel 1984, Davey 1988, Davey y Cooksey 1989 Mount *et al.* 1991).

Los cálculos de cada variable climática (Anexo 1.6), tienen como base la información correspondiente a la tendencia del clima en la región del Altiplano Cundiboyacense para 30 años, 1981 – 2011, resultado del procesamiento de series de datos climáticos de alrededor de 233 estaciones climáticas, realizado por CORPOICA (2012).

Temperatura T

Se estableció el efecto de la temperatura sobre los periodos de desarrollo de teleoginas (Figura 24A.1), fecundidad, huevos (Figura 24A.2) y larvas (Figura 2A.3); donde se determina que para avanzar de un estado a otro debe haber una acumulación de grados centígrados semanal (AGS), que les permita alcanzar el nivel requerido para completar su desarrollo, de lo contrario mueren. La fecundidad, es decir número de huevos por hembra, está dada además de la temperatura, por el tipo de hospedero *Bos taurus* y la resistencia desarrollada por este a *R (B) microplus*. Los valores resistencia fueron asignados con base al coeficiente de resistencia desarrollado por Mount *et al.* (1991) a partir de Suthers *et al.* (1986), los cuales se asocian a la fecundidad media, bajo una temperatura óptima y puntos

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

críticos por encima y debajo del valor óptimo (Anexo 1.2). El valor crítico mínimo para los estados de teleoginas y huevos es de 12°C, ya que los procesos de oviposición y eclosión respectivamente, se reducen durante un período de 9 semanas o superior, bajo estas condiciones. Mientras que a los 25°C estos procesos se llevan con éxito (Davey 1988, Davey y Cooksey 1989). Con respecto a las larvas, su longevidad en el ambiente es de mayor duración en temperaturas constantes de entre 15 – 22°C que en 29°C o superiores, luego el valor crítico mínimo para este estado es de 15°C y el valor crítico máximo es de 22°C (Hitchcock 1955).

Déficit De Saturación (Ds)

La relación entre el déficit de saturación y la sobrevivencia (**S**) o mortalidad (**M**) de los huevos fue establecida por Teel (1984), quien determinó que a mayor saturación se incrementa la pérdida de masa de huevos y se reduce la eclosión en *Boophilus microplus*, donde valores >10.7 o >11.8 mm Hg reducen los porcentajes de eclosión, mientras que huevos expuestos entre 1.07 – 6.68 mm Hg, fueron viables y tuvieron éxito para continuar al siguiente estado.

Índice de precipitación

El índice de precipitación se plantea como un proceso que provee información sobre la acumulación y la disminución en el efecto de la precipitación (Mount *et al.* 1991).

Factor de encuentro con el hospedero (FEH)

El estado final de la fase de vida libre, es el de las larvas en busca del hospedero; los cálculos tienen como base, la propuesta de Surtherst *et al.* (1977) y Mount *et al.* (1991). Este proceso está dado por una tasa denominada *Factor de encuentro con el hospedero (FEH)*, (Figura 24A.4, Anexo 1.5). Se determina, a partir del efecto de la temperatura (**ET**), la densidad de las larvas en el ambiente (**DLA**) y una base de tasa de encuentro con el hospedero (**BTFEH**), que se calcula a partir de una relación exponencial, como función de la densidad del hospedero (**DH**). Los coeficientes del efecto de la temperatura sobre el factor de encuentro, se desarrollaron a partir de ecuaciones cuadráticas, utilizando el valor de la media del factor de encuentro óptimo y puntos críticos por encima y debajo del valor óptimo (Apéndice 1.5); por otra parte, la relación de la densidad de las larvas con el FEH

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

fue calculada mediante una ecuación logarítmica, que pretende reflejar como evita a las larvas el ganado. Por último, el FEH es aplicado para larvas mayores a una semana

Relación dependiente con el paisaje y el hospedero

La relación entre la garrapata y el paisaje, se estableció con base en el planteamiento de Teel *et al.* (1996 y 1997); quienes concluyeron que las infestaciones de garrapatas se mantienen durante periodos más largos de tiempo en hábitats con coberturas o algún tipo de dosel como arbustos o mosaicos con mezquite, que en hábitats abiertos como pastos. Teniendo en cuenta este planteamiento, se estableció la preferencia de hábitat de *R. (B) microplus* para el Altiplano Cundiboyacense, mediante la clasificación y agrupamiento de las coberturas de uso de la tierra de la región en tres categorías; **hábitats óptimos o favorables**, los cuales se determinaron a partir de la presencia o asociación con algún tipo de cobertura arbórea, como los bosques, los mosaicos de pastos con cultivos y/o bosques; **hábitats medianamente óptimos o favorables**, como los cultivos, arbustales y los herbazales; **hábitats desfavorables** como los pastos abiertos, áreas abiertas sin ningún tipo de cobertura arbórea, infraestructura, áreas desnudas y sin información (Tabla 6). Se calculó el porcentaje del área para las tres categorías de preferencia de hábitat, con base en el área total de las coberturas registradas, en el mapa de coberturas de usos de la tierra suelo Corin Land Cover 2002, ajustada para Colombia, escala 1:100.000 (IDEAM *et al.* 2002).

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Tabla 6. Categorías y porcentaje de las preferencias de hábitat para *R (B) microplus* en el Altiplano Cundiboyacense, Colombia. Cálculos de porcentaje para las tres categorías definidas a partir del planteamiento de Teel *et al.* (1996.- 1997), hábitats favorables, hábitats medianamente favorables, hábitats desfavorables. Fuente cartográfica: IDEAM *et al.* 2002.

COBERTURA DE USO	Área (ha)	Porcentaje	Categoría	Porcentaje total de preferencia
Mosaico Pastos Cultivos	421.012	22		0,46
Mosaico Pastos - Cultivos - Bosques	114.508	6	hábitats óptimos	
Mosaico de cultivos-pastos- espacios naturales	190.178	10	favorables	
Bosques	172.958	9		
Arbustales -herbazales	389.730	20	hábitats medianamente	0,24
Cultivos	84.375	4	favorables	
Pastos (Limpios, enmalezados, arbolados)	383.608	20		0,3
No información(Nubes)	105.133	5		
Infraestructura	48.788	2		
Tierras desnudas -Arenales	22.289	1	hábitats	
Zonas quemadas	287	0	desfavorables	
Sistemas Hídricos	14.254	1		
Zonas Pantanosas	4.400	0		
Extracción minera	2.583	0		
Afloramientos rocosos	478	0		

La densidad del hospedero (DH) 0.73 Cabezas/Ha, se calculó a partir del inventario de cabezas de bovino, disponible para Colombia (Ministerio de Agricultura y Desarrollo, 2006). Tanto el paisaje como el ganado, son variables auxiliares, constantes durante el proceso de modelamiento.

Submodelo 2: Fase parasitaria: sobre el hospedero

Las tasas de sobrevivencia ($S_1 - S_2$) sobre el hospedero están dadas por el tipo de ganado, son constantes y generadas específicamente para la especie *Bos taurus*, asociadas al nivel de resistencia desarrollado para *R (B) microplus* (Anexo 2. a, b, c.), definido para cada estado del ciclo de vida parasítico y sus tiempos de desarrollo (Tabla 5). Las estimaciones de estos valores se desarrollaron para tasas máximas y mínimas de sobrevivencia y umbrales de exposición y carga semanal del hospedero para cada estado del ciclo de vida de esta fase, estimados entre $< 1000 - <15.000$ garrapatas (larvas, ninfas, adultos), los cuales fueron constantes entre los estados del ciclo de vida (Anexo 2)

3.3. RESULTADOS

3.3.1. Evaluación del Modelo

Si bien no hay datos de campo disponibles sobre la densidad de población de las garrapatas en Colombia, la base del conocimiento sobre la historia de vida de *R (B) microplus* es sólida en relación con los periodos de las fases de vida y la sobrevivencia en diferentes estaciones climáticas y tipos de hábitat (Betancourt 2004, Teel *et al.* 1996). Lo anterior hizo posible evaluar la capacidad del modelo representando los efectos de la estacionalidad y los tipos de hábitat de la región sobre la dinámica de la población de *R (B) microplus*, teniendo en cuenta el comportamiento registrado para los periodos de los estados de vida libre con la estacionalidad en la revisión de Betancourt (2004) y CORPOICA 2011. Comparando los periodos de picos de brotes de larvas, huevos y hembras engordadas con lo presentado en dicha revisión, permitió identificar si el comportamiento de las poblaciones obtenidas en el modelo era coherente con lo observado para los estados de vida de libre de *R (B) microplus* en Colombia. Por otra parte, de acuerdo a las observaciones realizadas con adultos en la región de estudio por CORPOICA (2011), se evidenció que inician su incremento hacia el final del primer trimestre seco, el cual incluye los meses de diciembre a enero, llegando a un pico de crecimiento hacia los meses más lluviosos, marzo, abril y mayo Betancourt (2004); lo que coincide con los resultados del modelo. En la figura 3 se observa que la población de huevos, larvas y teleoginas inician su incremento hacia la mitad del periodo de los trimestres secos (PTS: diciembre, enero, febrero – STS: junio, julio, agosto) y su pico

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

se encuentra en los trimestres húmedos (PTH: marzo, abril, mayo – STH: septiembre, octubre, noviembre).

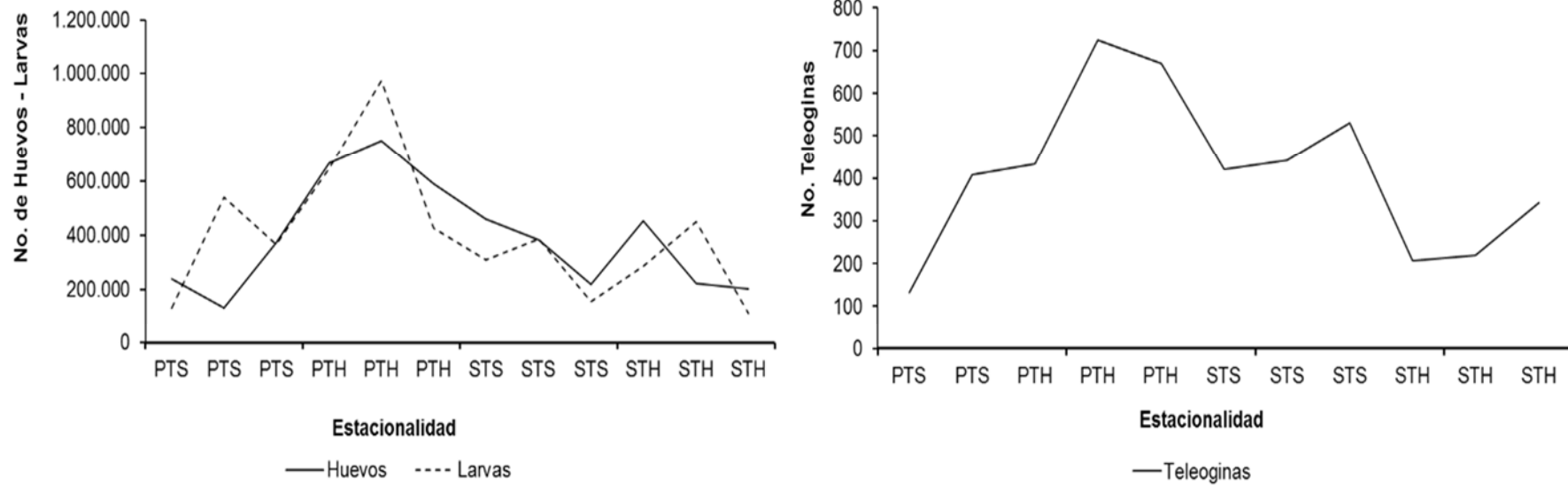


Figura 25. Comportamiento estacional de las poblaciones de estados de vida libre de *R (B) microplus*, resultantes del modelo. Huevos y larvas y teleoginas. **PTS**: Primer semestre seco (diciembre- enero - febrero); **PTH**: Primer trimestre húmedo (marzo – abril - mayo); **STS**: Segundo trimestre seco (junio – julio - agosto); **STH**: Segundo trimestre húmedo (septiembre – octubre -noviembre).

3.3.2. Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad del modelo, consistió en ajustar la base de la tasa del factor de encuentro (BTFEH) a partir de un factor de ajuste (FA) (Figura 24), ya que este es el proceso más sensible del modelo, debido a que representa el acceso de las garrapatas desde el ambiente al hospedero. Dado que no hay una cuantificación de línea base, de la tasa de recolección de garrapatas por parte del ganado en un paisaje, se hace necesario desarrollar este factor ya que permite que se ejecute el ciclo de desarrollo de la garrapata completamente.

Para el establecimiento de los valores de FA, se definió: i. un valor que permitiera mantener viva la población en el tiempo, este fue **0.08**, ya que, al correr el modelo con valores inferiores a este, las poblaciones no eran viables y desaparecían a lo largo de los años, y de acuerdo a las observaciones actuales la garrapata se ha mantenido en al menos los últimos 10 años. ii. un valor que reflejara o se acercara al desarrollo óptimo de la población, el cual se asignó a partir de los resultados de Mount *et al.* (1991) encontrados para una zona con condiciones óptimas como Brownsville, Texas, U.S.A., el cual fue **0.09**; y, iii. un valor que permitiera reflejar desarrollo “desbordado” de las poblaciones de *R (B) microplus* para cualquier región, **0.1**. La simulación se inició para todos los casos, con una infestación de 100.000 larvas, generando simulaciones para una serie de 16 años (Figura 26).

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

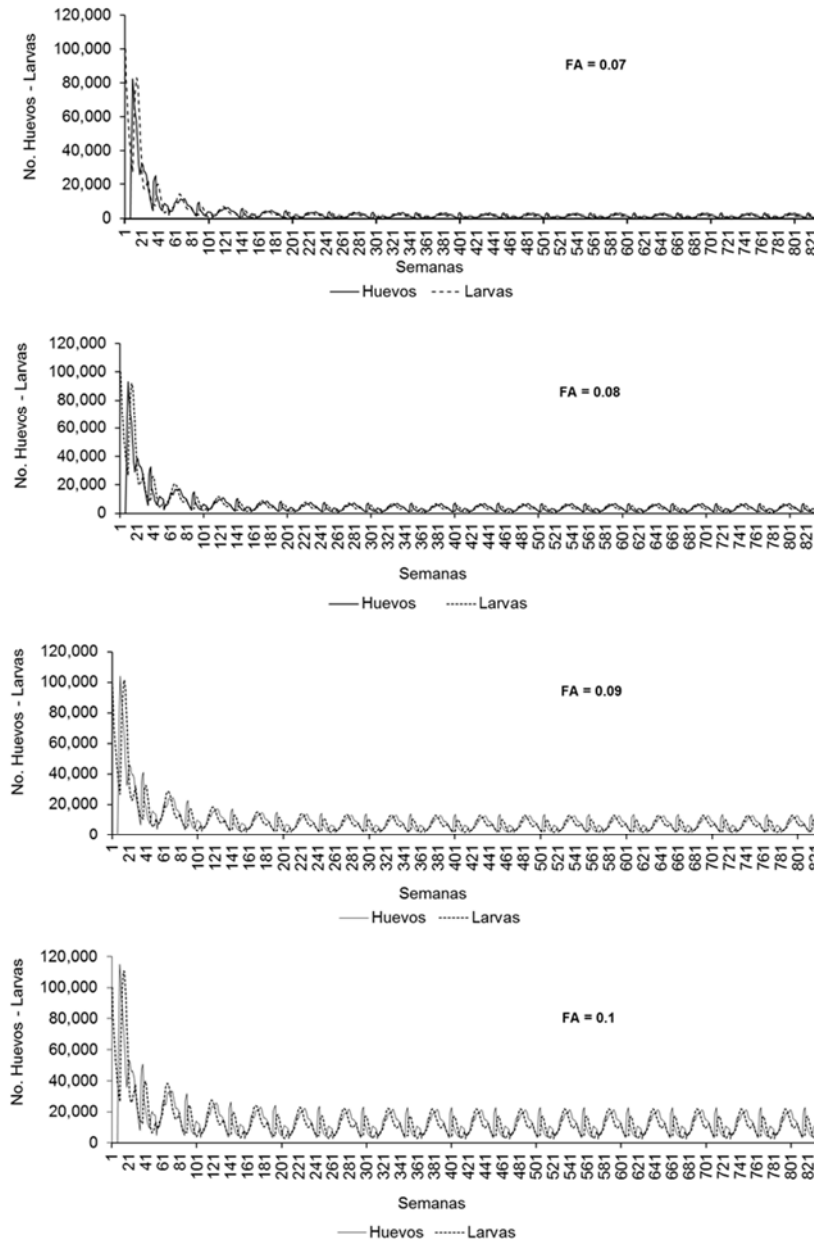


Figura 26. Análisis de sensibilidad. Comportamiento para la serie de 16 años (832 semanas) de la población de *R (B) microplus* en el Altiplano Cundiboyacense, bajo diferentes valores del factor de ajuste (FA). Se observa que independiente del valor del FA las poblaciones mantienen una dinámica temporal similar, pero el número de individuos varía ya sea por incremento o disminución. Se incluye el FA 0.07, para ilustrar la desaparición de la población en el tiempo con un valor < a 0.08, a partir del FA 0.08 las poblaciones de mantienen y son más estables y se asume como el más ajustado para para las condiciones del Altiplano; 0.09, presenta valores cercanos a condiciones óptimas para el desarrollo *R (B) microplus*, mientras que 0.1 Supera los valores poblacionales a condiciones óptimas de desarrollo de la especie.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

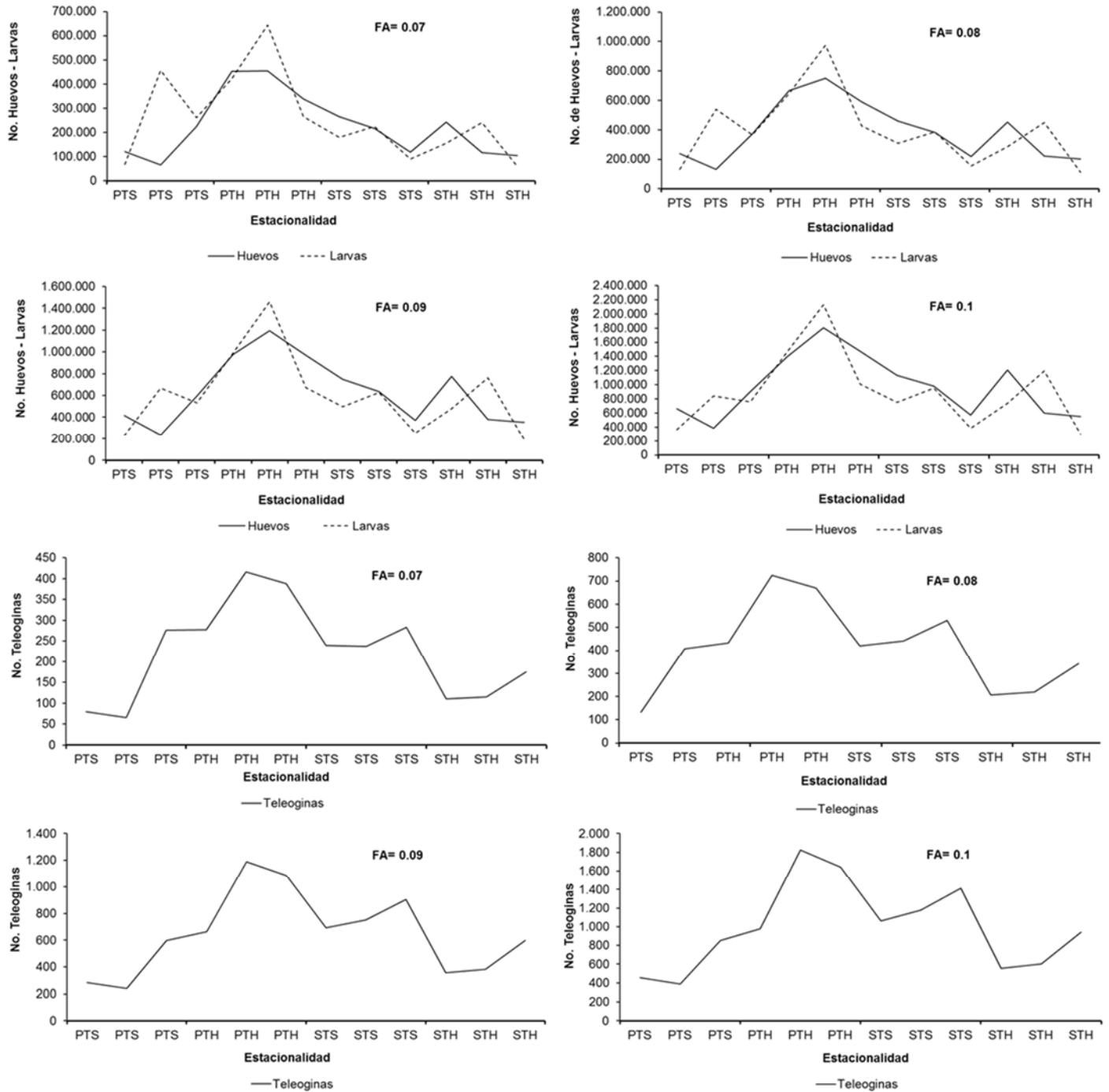


Figura 27. Comportamiento estacional de la población de estados de vida libre de *R (B) microplus* en el Altiplano Cundiboyacense, bajo los valores de FA evaluados en el análisis de sensibilidad. PTS, Primer Semestre Seco; PTH, Primer Trimestre Húmedo; STS, Segundo Trimestre Seco; STH, Segundo Trimestre Húmedo.

Se observó, que el comportamiento de las poblaciones de los diferentes estados del ciclo de desarrollo, presentan la misma tendencia estacional para los diferentes valores de FA utilizados, donde en los periodos secos decrecen las poblaciones y aumentan hacia los periodos húmedos en los picos más lluviosos (Figura 27). No existe un referente de las densidades poblacionales de *R (B) microplus* en la región, dado que esta especie puede estar en la fase inicial del proceso de introducción a la región, (CORPOICA 2011, Betancourt 2012); sin embargo, los valores de ajuste arriba expuestos permitieron observar valores aproximados bajo las tres condiciones de FA mencionadas.

3.3.3. Aplicación del Modelo

Se generaron simulaciones bajo diferentes escenarios de Temperatura °C (T), Índice de precipitación (IP), Paisaje (P) y Densidad del hospedero (DH), teniendo como referente los resultados del primer capítulo, donde se observó que el paisaje, junto con la presencia del hospedero, la altitud, la precipitación, la temperatura y la humedad del primer trimestre húmedo, fueron las variables más relevantes en la construcción del modelo de distribución de *R (B) microplus* en altiplano Cundiboyacense. Se definieron escenarios para poder identificar el comportamiento de las poblaciones de *R (B) microplus*, bajo diferentes condiciones, y así apoyar la identificación de las variables ambientales que mayor influencia tienen en el desarrollo de las poblaciones de esta garrapata en la región, además de generar información de línea base para apoyar sistemas de control y manejo de este ectoparásito. La aplicación se enfoca en el FA 0.08, ya que es el que se asume como más ajustado al altiplano Cundiboyacense.

Temperatura

La temperatura es una de las variables más importante en el desarrollo de las especies de artrópodos, por lo que cambios en esta variable podrían desencadenar en cambios del desarrollo y establecimiento de las especies. El cambio climático se evidencia principalmente en los cambios de la temperatura, y se plantea como una de las principales causas del aumento de la distribución de *R (B) microplus* en el Altiplano Cundiboyacense (CORPOICA 2011). Por lo anterior, se generaron simulaciones para representar el comportamiento de la población de esta especie, bajo dos condiciones de temperatura

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

superiores a las actuales, incrementándola en $\approx 1^{\circ}\text{C}$ y 2°C . Lo anterior se fundamenta en las proyecciones generadas por el IDEAM (2008) IDEAM *et al.* (2015) para periodos futuros como 2040 – 2070, donde se estima que el cambio de temperatura en la región se encuentra en este rango de incremento.

En términos generales, las simulaciones permiten evidenciar, que a medida que aumenta la temperatura las densidades poblacionales aumentan notablemente donde las poblaciones de huevos que para las condiciones observadas presentan 200.000 individuos, para el mes de enero pueden llegar hasta 5.000.000 con un incremento de 1°C y hasta 10.000.000 con un incremento de 2°C (Figura 28).

Índice de Precipitación

La influencia de la precipitación en el desarrollo de *R (B) microplus* no ha sido establecida claramente, sin embargo, en los resultados obtenidos en el primer capítulo la relacionan como una de las variables más importantes en la distribución de esta especie, pero no se determinó si, esta influencia es limitante o favorable. Para determinar la influencia de esta variable sobre la población de esta garrapata en el altiplano, se aumentó en 6.2 y se disminuyó en 6.2 los valores del IP, lo anterior se desarrolló tomando como base las proyecciones generadas por el IDEAM (2008) IDEAM *et al.* (2015) para el periodo 2040, donde se estimó que la precipitación en Cundinamarca y Boyacá (Departamentos que incluyen el Altiplano Cundiboyacense) presentará una tendencia al aumento, entre el 20 – 30% con respecto al periodo actual.

Se observó que, al aumentar los valores del índice de precipitación, las poblaciones de los estados de vida libre disminuyeron, con respecto a la línea base. La tendencia estacional para el escenario 1 se mantiene para las larvas, mientras que para los huevos cambia la curva iniciando el aumento e iniciando su pico antes de que termine el primer trimestre seco. Para el escenario 2 se mantienen la tendencia estacional, pero con dos picos bastante altos iniciando el primer trimestre seco y en el primer trimestre húmedo; tanto la tendencia estacional como la población de las teleoginas cambia en los dos escenarios con valores en la línea base de 800, en el escenario 1 descendiendo a 250 y en el escenario 2 aumentando hasta 8.000 individuos (Figura 29).

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

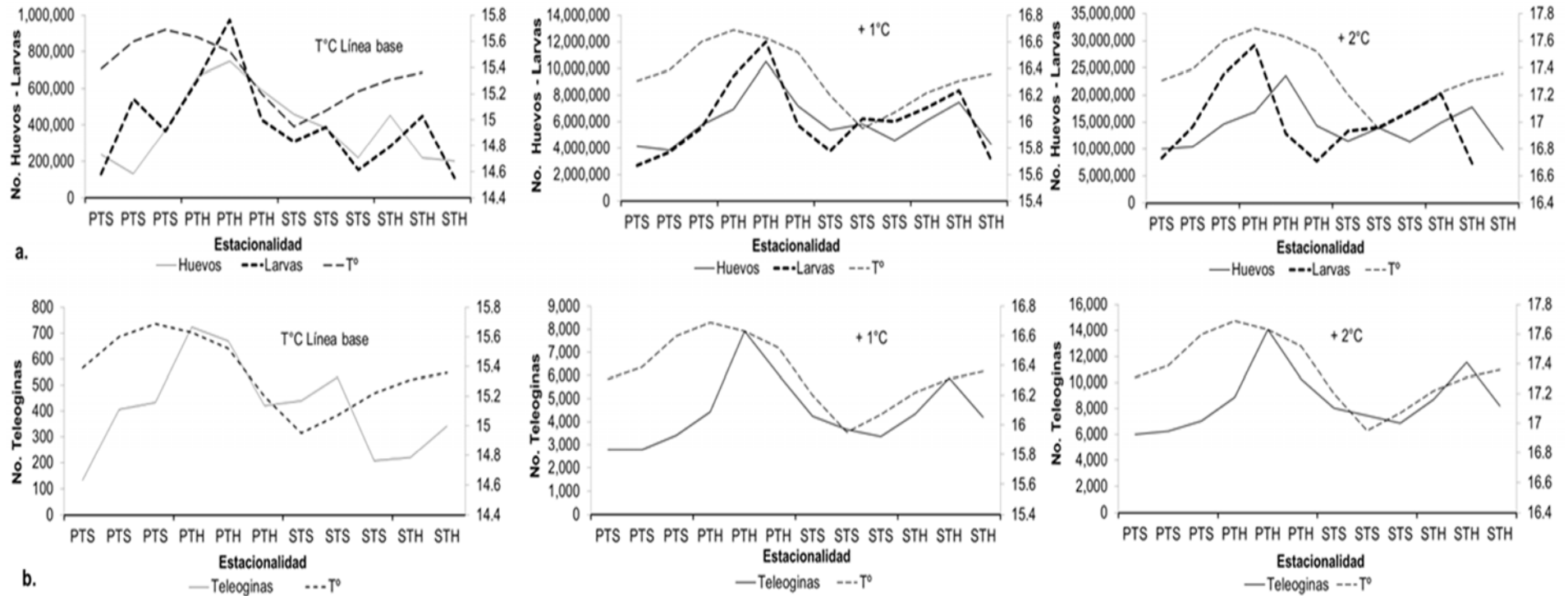


Figura 28. Comportamiento de las poblaciones de estados de vida libre, a. huevos, larvas; b. teleoginas, bajo diferentes temperaturas (Línea base; incremento de 1° (+1°C); incremento de 2° (+2°C), para el FA más acorde con las condiciones del altiplano 0.08. Se observa que al aumentar la T°C se incrementan las poblaciones de los tres estados. PTS, Primer Semestre Seco; PTH, Primer Trimestre Húmedo; STS, Segundo Trimestre Seco; STH, Segundo Trimestre Húmedo.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

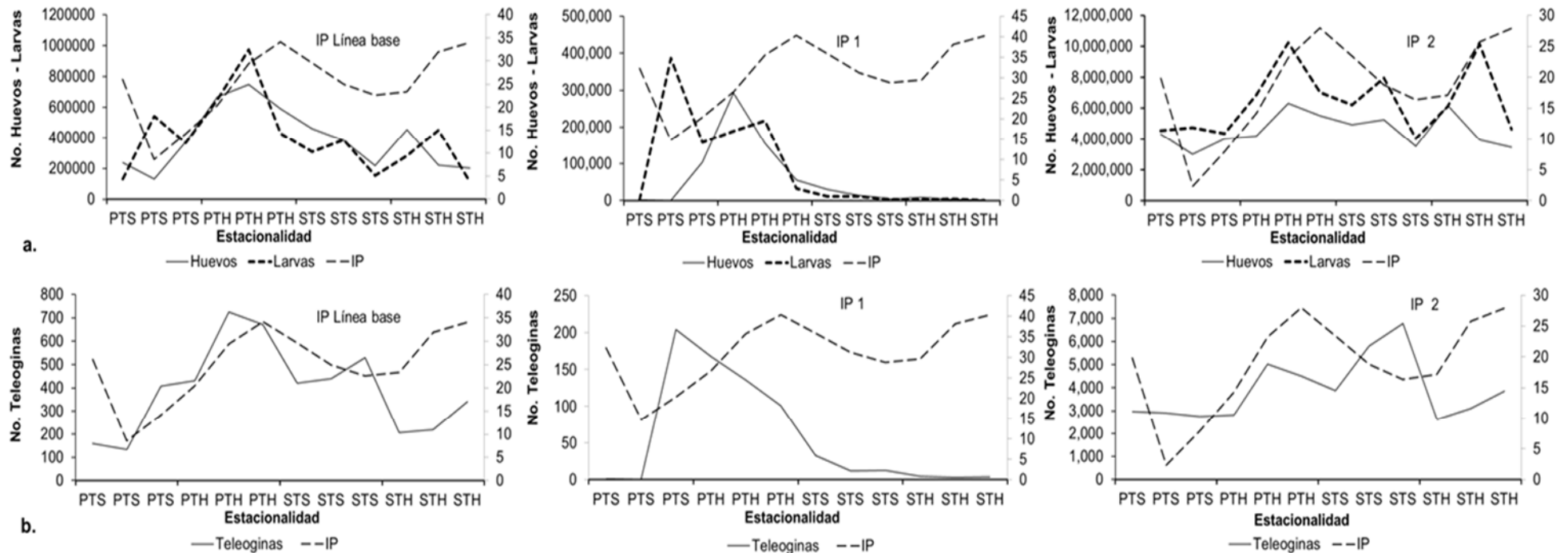


Figura 29. Comportamiento de las poblaciones de estados de vida libre, a. huevos, larvas; b. teleoginas, bajo diferentes valores de Índices de precipitación, IP Línea base; IP 1: incremento de 6.2 en el promedio del índice (el incremento del IP se basó en los cambios de precipitación para la región, calculados por el IDEAM 2015 para el periodo 2011 - 2040). Se observa que al aumentar el IP disminuyen las poblaciones de los tres estados, mientras que si disminuye el IP aumentan las poblaciones de los tres estados. PTS, Primer Semestre Seco; PTH, Primer Trimestre Húmedo; STS, Segundo Trimestre Seco; STH, Segundo Trimestre Húmedo.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Como un último escenario de las variables climáticas, se combinó el aumento de la temperatura en 1°C y el aumento del índice de la precipitación en 6.2 (Figura 30). Tanto la estacionalidad como la densidad cambian al realizar el aumento en estas dos variables. Se observa que disminuyen las poblaciones de los tres estados, la población de larvas inicia su incremento en los meses del primer trimestre seco, descienden finalizando el trimestre seco pero vuelve a incrementar su población hacia el pico de los trimestres húmedos, para luego volver a descender al iniciar el segundo trimestre seco, mientras que los huevos mantienen poblaciones bajas en el trimestre seco, incrementando su población hacia el pico del trimestre húmedo, para luego descender con tendencia a disminuir completamente. El comportamiento de las Teleoginas al igual que el de las larvas y los huevos, evidencia una tendencia a la disminución a lo largo del periodo de modelamiento. Inicia el incremento de sus poblaciones hacia la mitad del primer trimestre seco, con picos en el primer trimestre húmedo, empezando a descender hacia el segundo trimestre.

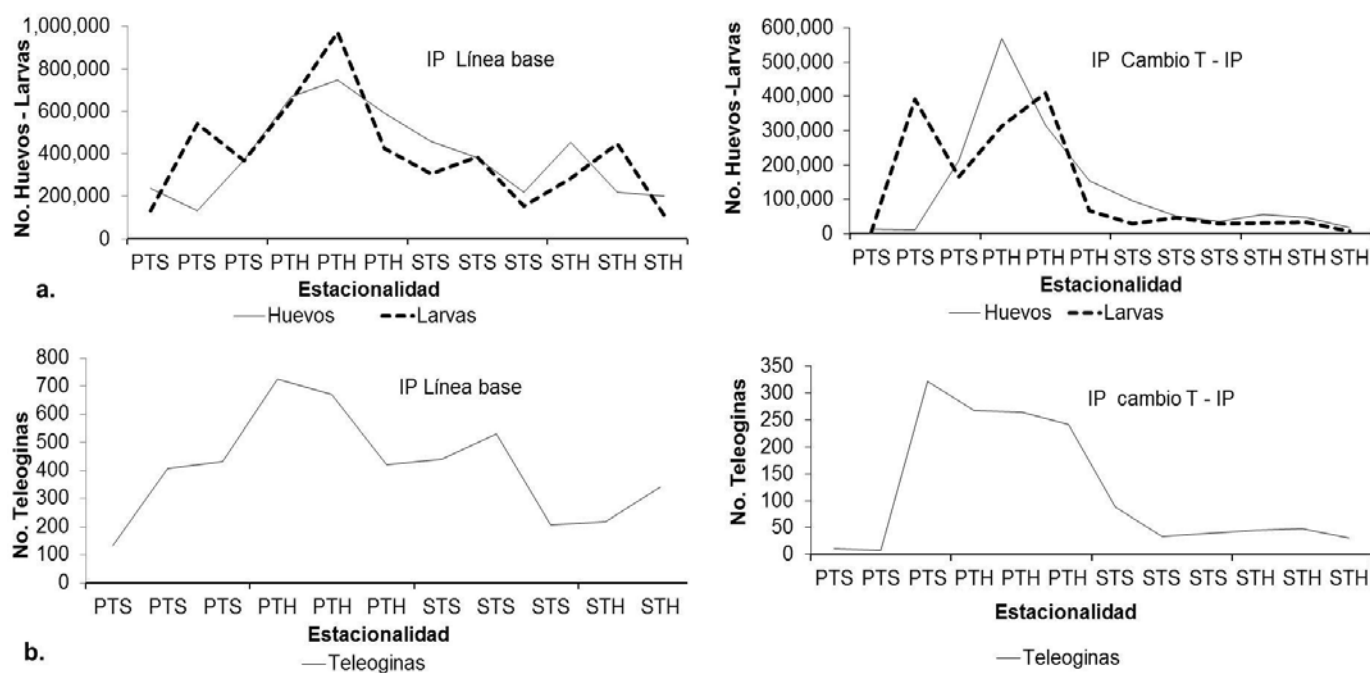


Figura 30. Comportamiento de las poblaciones de estados de vida libre, a. huevos, larvas; b. teleoginas, bajo diferentes valores de Índices de precipitación y Temperatura, el cambio de los valores, se basaron en los cambios de precipitación y temperatura para la región, calculados por el IDEAM 2015 para el periodo 2011 - 2040. Se observa que al aumentar el IP disminuyen las poblaciones de los tres estados, mientras que si

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

disminuye el IP aumentan las poblaciones de los tres estados. PTS, Primer Semestre Seco; PTH, Primer Trimestre Húmedo; STS, Segundo Trimestre Seco; STH, Segundo Trimestre Húmedo.

Paisaje

El paisaje es otro de los determinantes importantes para el establecimiento de esta garrapata, donde las áreas con algún tipo cobertura o cobertura arbórea son las más favorables para los estados de vida libre (Teel *et al.* 1997), por lo que se generaron simulaciones para dos escenarios alternos de paisaje diferentes al de línea base (presentado en la metodología). Los escenarios desarrollados, consistieron en el aumento a 0.60 (P1) y la disminución a 0.30 (P2), de las áreas óptimas o adecuadas (bosques y mosaicos con coberturas arbóreas) para *R. (B) microplus*, ajustando igualmente los valores de las áreas no adecuadas (pastos y áreas abiertas) y medianamente favorables (cultivos/ herbazales y arbustales), de tal manera que el total de la proporción fuera 1 (Tabla 7), los valores de los escenarios fueron definidos aleatoriamente.

Tabla 7. Valores de los escenarios de paisaje para la aplicación del modelo de población de *R. (B) microplus* en el Altiplano Cundiboyacense, Colombia.

Escenarios	Bosques/Mosaicos	Cultivos/Herbazales	Pastos – áreas abiertas	Total
Línea Base (estado actual)	0.46	0.24	0.30	1
Escenario 1	0.60	0.15	0.25	1
Escenario 2	0.30	0.25	0.45	1

Los resultados arrojados por las simulaciones, indican que al aumentar la proporción de las áreas denominadas como favorables, las poblaciones de las larvas aumentan hasta en 200.000 larvas mientras que los huevos se mantienen y las teleoginas, al igual que las larvas aumentan sus poblaciones. Se observa que si se disminuyen las áreas favorables las poblaciones de los tres estados de vida libre decrecen; por otro lado, la estacionalidad presenta la misma tendencia para los tres escenarios de paisaje (Figura 31).

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

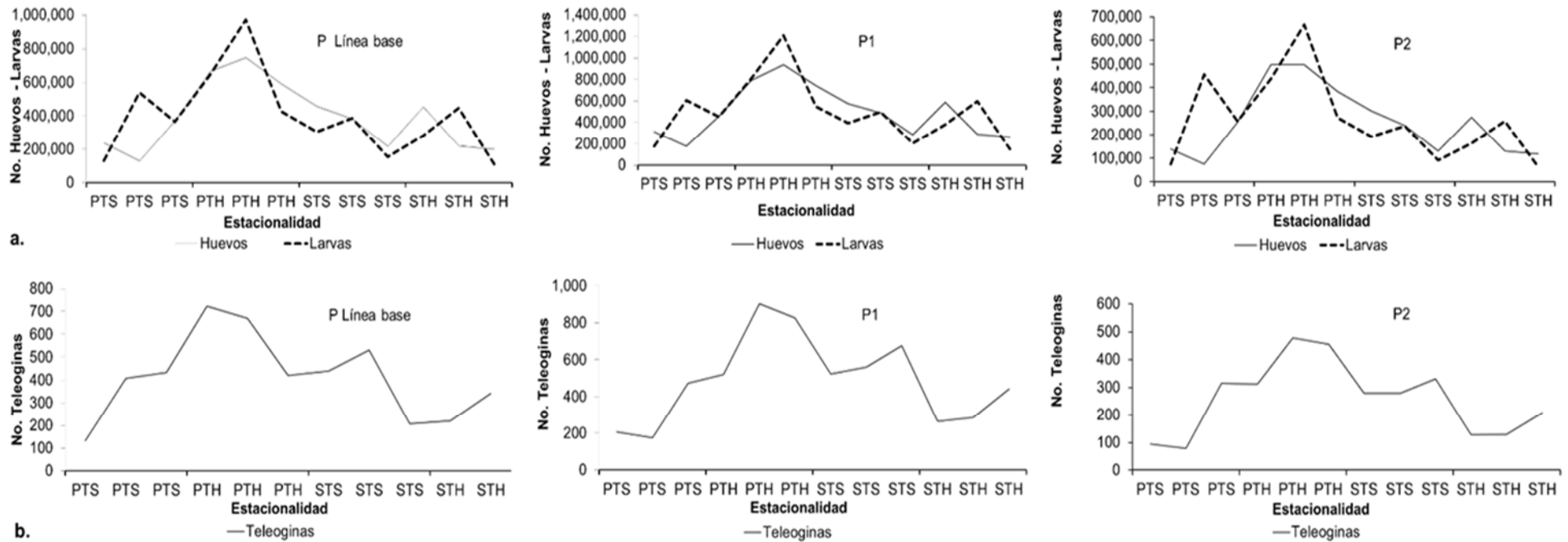


Figura 31. Comportamiento de las poblaciones de huevos - larvas, bajo diferentes condiciones de paisaje línea base; P1: incremento de áreas óptimas a 0.60; P2: reducción de áreas óptimas a 0.30, para el FA más acorde con las condiciones del altiplano 0.08. Se observa que al aumentar la proporción de las áreas óptimas aumenta la población (P1), mientras que sí, se reduce la proporción de áreas óptimas la población decrece.

Densidad de Hospedero

Al ser un ectoparásito, esta garrapata necesariamente requiere de su hospedero para completar su ciclo de vida, por lo que el aumento o la disminución de este factor en una región podrían afectar el éxito del ciclo de vida de *R (B) microplus*. Para determinar esta relación se generaron simulaciones bajo una densidad superior (1) a la actual (0.73) y una inferior (0.5). Los resultados evidenciaron que el aumento en la densidad del hospedero (DH), podría incrementar el doble las poblaciones de los estados de vida parasitarios desde 2.000 hasta ≈ 4.000 para el caso de las larvas o de 4.000 para el caso de las ninfas; mientras que la disminución en la Densidad del hospedero sugiere una disminución en las poblaciones de estados parasitarios (Figura 32).

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

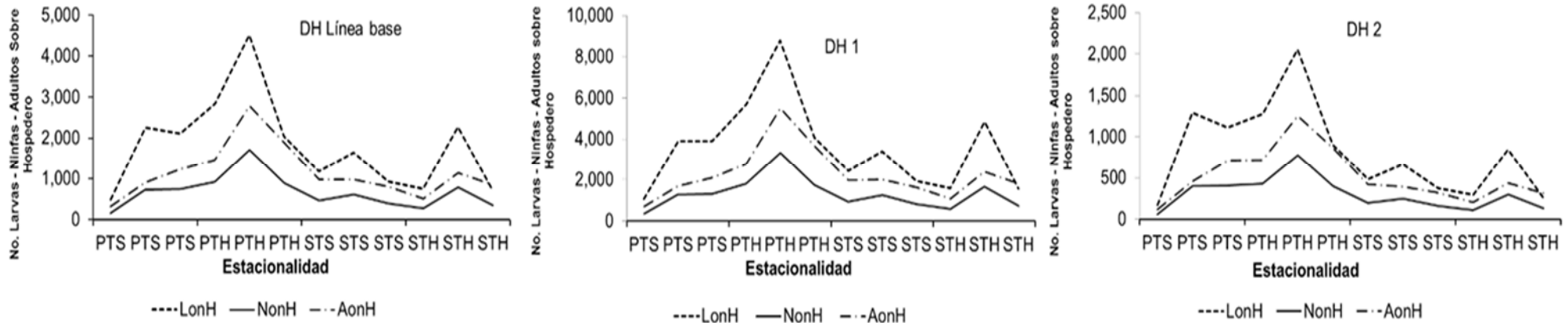


Figura 32. Comportamiento de las poblaciones de larvas, ninfas y adultos sobre el hospedero Línea base; DH1: incremento a 1; DH2: reducción a 0.5), para el FA más acorde con las condiciones del Altiplano 0.08. **LonH**: Larvas sobre hospedero; **NonH**: Ninfas sobre hospedero; **AonH**: Adultos sobre hospedero.

3.4. DISCUSIÓN

Las simulaciones evidencian que el aumento de las poblaciones de garrapatas inicia cuando están finalizando los trimestres secos (diciembre-enero-febrero; junio-julio-agosto) del año y su pico de aumento se encuentra en los meses con más lluvias (marzo-abril-mayo; septiembre-octubre-noviembre), presentándose el mayor número de individuos en los primeros trimestres y descendiendo hacia los segundos trimestres (Figura 33). En los primeros trimestres se presentan las temperaturas anuales más altas para la región 16°C, un decrecimiento en el déficit de saturación 3 mm/Hg, y un aumento en el índice de precipitación ≈ 30 (Figura 33 a, b y c), estos resultados, responden a las características fisiológicas y ecológicas favorables conocidas para esta especie; puesto que, el umbral mínimo de temperatura determinado para la oviposición y la eclosión es de 12°C, sin ser el ideal, ya que reduce la viabilidad de estos procesos (Hitchcock 1955); mientras que 15 °C es el umbral mínimo para la sobrevivencia de las larvas (Davey 1988, Davey y Cooksey 1989), condiciones presentadas durante los periodos arriba mencionados para el Altiplano. Por otra parte, se observa que el déficit de saturación (DS) de acuerdo a los resultados obtenidos por Teel. (1984), se encuentra dentro del rango ideal para la sobrevivencia y eclosión, ya que el rango óptimo para la eclosión oscila entre 1.07 – 6.68 mm Hg (Figura. 33).

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

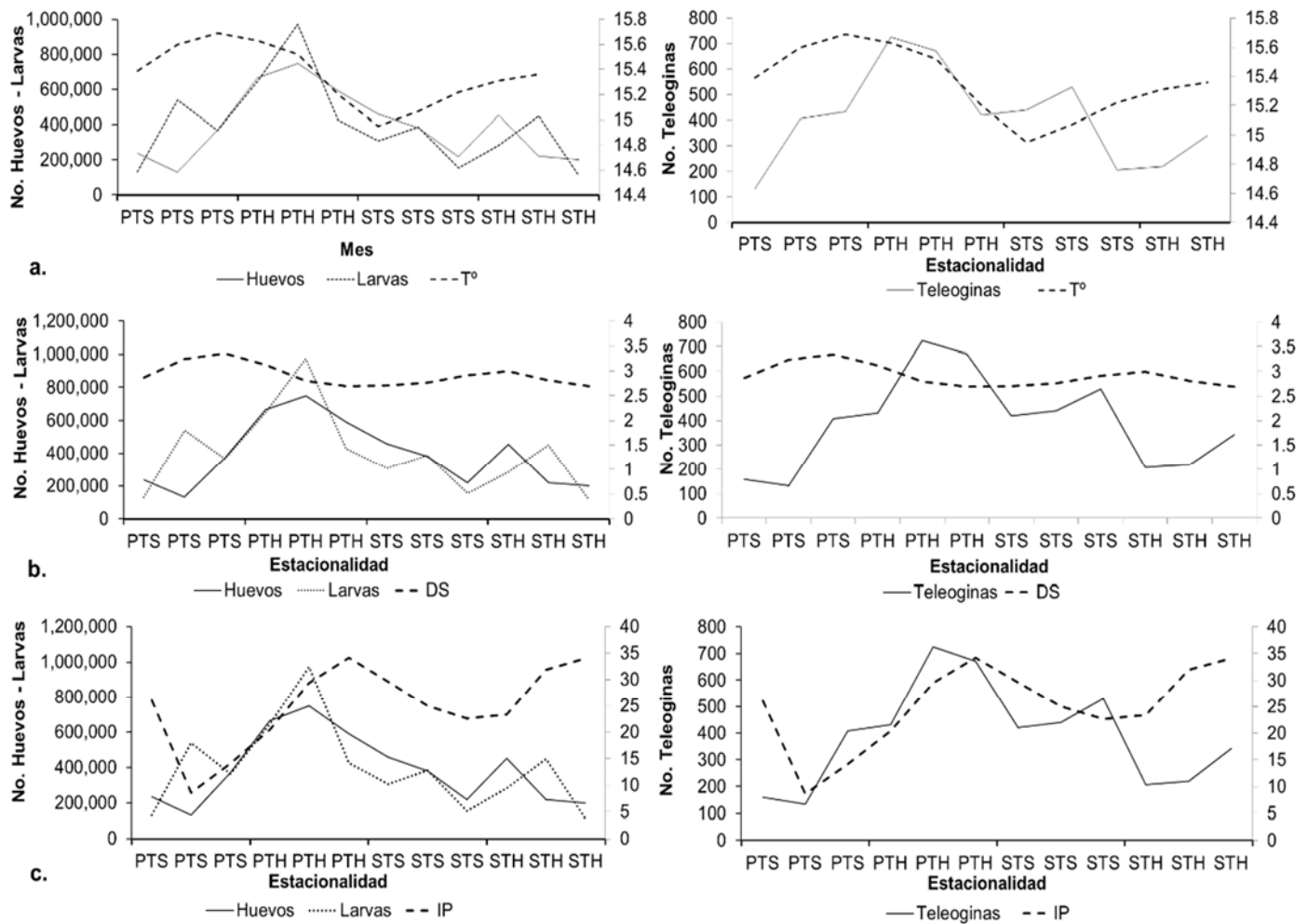


Figura 33. Comportamiento de las poblaciones de estados de vida libre, con respecto a las variables climáticas. a. Temperatura ($T^{\circ}\text{C}$); b. Déficit de saturación mm/Hg (DS); c. Índice de precipitación (IP).

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

El establecimiento de las especies depende de su respuesta frente a un conjunto condiciones ambientales, ya sean bióticas o abióticas de una región dada; lo que se puede observar en la región del Altiplano Cundiboyacense, donde en un conjunto de condiciones ambientales que aunque no son las ideales, si pueden favorecer el desarrollo de los estados de vida libre de esta garrapata, permitiéndoles sostenerse hasta que se adhieran a su hospedero, el cual se distribuye a lo largo de la región, y hace más viable la finalización y el éxito del ciclo de vida de *R (B) microplus*.

La combinación de escenarios entre la temperatura y el índice de precipitación, permitió ver resultados que sugieren que la variable que puede estar contralando esta garrapata en la región es la precipitación, dado que, al aumentar la precipitación por si sola las poblaciones disminuyen mientras que, al aumentar la temperatura por si sola las poblaciones aumentan, y al aumentar las dos variables al mismo tiempo como podría ocurrir en un escenario hacia el año 2040, las poblaciones de los estados de vida libre disminuyen, sugiriendo la importancia de la precipitación en el control del crecimiento de esta especie en el Altiplano Cundiboyacense.

Los elementos del paisaje también juegan un papel importante para el desarrollo de los estados de vida libre *R (B) microplus*, (Teel *et al.* 1996 y 1997; Estrada Peña *et al.* 2001, 2005), concluyen que los tipos de hábitat que presentan condiciones favorables para el establecimiento de esta garrapata, son los que cuentan con algún tipo de cobertura arbórea, mientras que los menos favorables son los pastos abiertos sin ningún tipo de cobertura. Para el Altiplano Cundiboyacense, la mayor proporción de área la contienen los mosaicos de pastos con cultivos y/o bosques, y los bosques, seguidos de los pastos abiertos y en última estancia los arbustales y herbazales; lo que contribuye favorablemente para el desarrollo y establecimiento de *R (B) microplus* en la región (Figura 31). Además, se observa que los valores de las tasas de mortalidad, son menores para los hábitats con dosel, sugiriendo la mayor favorabilidad de estos los habitats para el desarrollo de la garrapata (Tabla 8).

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Tabla 8. Tasas de mortalidad obtenidas en el modelo de *R (B) microplus* para el Altiplano Cundiboyacense. S1, Supervivencia 1; S2, Supervivencia 2.

Estados	Bosques/Mosaicos		Cultivos/Herbazales		Pastos – áreas abiertas	
Tiempos de supervivencia	S 1	S2	S1	S2	S1	S2
Huevos	0.11	0.25	0.13	0.28	0.18	0.36
Larvas	0.12	0.17	0.14	0.19	0.17	0.23
Hembras Engordadas	0.10	0.24	0.13	0.27	0.17	0.35

Lo anterior sugiere que, aunque las condiciones ambientales del Altiplano no son las óptimas para un desarrollo exitoso de las poblaciones de esta especie, si cuenta con condiciones mínimas para que se pueda establecer, donde para este caso el hospedero se convierte en el punto clave para el éxito de su establecimiento, ya que se distribuye y está en constante movimiento a lo largo de la región; dado que, es una importante zona lechera del país. Por otro lado, la variabilidad climática, así como el cambio climático, pueden jugar un importante papel para el establecimiento e incremento de las poblaciones de *R (B) microplus* en el Altiplano (Figuras 28 - 30), puesto que de acuerdo a Peña *et al.* (2008), hay evidencia meteorológica de cambio climático en la región con una tendencia de aumento en la temperatura.

La evaluación de la relación entre los estados de vida libre huevos, larvas teleoginas, con el paisaje y el clima, refleja la favorabilidad de las áreas con coberturas arbóreas, ya que al aumentar su proporción se incrementan los picos de las poblaciones de los estados de vida libre, mientras que la disminución de estas áreas, refleja el decrecimiento de las poblaciones de los estados de vida libre, lo cual da un primer acercamiento de la dinámica de estas poblaciones y la configuración del paisaje, lo que se pudo inferir a partir de las variaciones en las variables de temperatura, paisaje, y hospedero, que evidencian la influencia de las mismas en el establecimiento de *R (B) microplus* una región dada, se observó que los aumentos son los que favorecen los brotes de las poblaciones, ya sea de áreas adecuadas (cobertura o dosel), la temperatura o el hospedero; mientras que la disminución en cualquiera de los tres presentarían condiciones poco favorables para su desarrollo; contrario a lo que ocurre con la precipitación, ya que el aumento del índice de precipitación estimula la reducción de las poblaciones de huevos, larvas y teleoginas (Figura 29).

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Por último, la modelación llevada a cabo no incluyó otros factores que pueden afectar el desarrollo de *R (B) microplus*, como enemigos naturales, o posibles hospederos alternativos, lo cual aún falta por ser estudiado a fondo en la región; esto sugeriría complementar este modelo más adelante incluyendo enemigos naturales como hongos; artrópodos como hormigas, ácaros y arañas; roedores y aves en algunos casos, los cuales podrían estar afectando el desarrollo de la garrapata en la región. La presencia del venado de cola blanca en la región podría ser un factor importante en futuras simulaciones, ya que podría ser un hospedero alternativo que, aunque no puede sostener grandes poblaciones de esta garrapata su presencia constituiría un agente importante en la reciente introducción de *R (B) microplus* en la región.

3.5. CONCLUSIONES

El desarrollo de este modelo de simulación de la dinámica poblacional de *R (B) microplus*, permite explicar más claramente el comportamiento de esta garrapata en la región, y se convierte en un completo que apoya el modelo de distribución del primer capítulo.

La temperatura y la precipitación son los factores determinantes en el desarrollo de *R (B) microplus* en el Altiplano Cundiboyacense. Con sus valores de línea base la población se mantiene al límite, sin embargo, si estos valores cambian las poblaciones cambian tanto su tendencia estacional o de densidad.

Se sugiere que la precipitación desde su línea base es la variable que podría estar limitando el establecimiento de *R (B) microplus* en la región (Figura 29).

De acuerdo al escenario de combinación de la temperatura y la precipitación, se puede deducir que el cambio climático no va a favorecer el establecimiento de esta especie en el Altiplano Cundiboyacense, ya que al observar las poblaciones resultantes bajos los valores de proyecciones al 2040 se observa que tenderán más a la reducción que al aumento (Figura 30).

3.6. BIBLIOGRAFÍA

- Benavides, E. 1984. Biología oviposicional de la garrapata *Boophilus microplus* en condiciones de los Llanos Orientales de Colombia. Rev. ICA. 19: 25 - 32
- Betancourt, J.A. 2004. Bioecología de las garrapatas en Colombia con énfasis en *Boophilus microplus*. Conferencia: Curso Taller sobre garrapatas para funcionarios de Tecnoquimicas. Bogotá. Septiembre 27.
- Betancourt, J.A. 2012. La garrapata puede colonizar altiplanos lecheros. Federación Colombiana de Ganaderos. Carta Fedegan. 129: 56 – 58.
- CORPOICA 2011. Modelización del efecto del cambio climático sobre la distribución de la garrapata *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* en el trópico alto colombiano. Informe técnico final. C.I. Tibaitata. Mosquera, Cundinamarca. 87p.
- CORPOICA 2012. Plan para el manejo de los impactos en el sector agropecuario ocasionados por la emergencia Invernal. C.I. Tibaitata. 341p.
- Cortés – Vecino, J.A., J.A. Betancourt Echeverri., J. J, Arguelles – Cárdenas y L.A. Pulido – Herrera. 2010. Distribución de garrapatas *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* en bovinos y fincas del Altiplano Cundiboyacense (Colombia). CORPOICA Cinch. Techno. Agropecu. 11(1): 73-84p.
- Davey, R. B.1988. Effect of temperature on the ovipositional biology and egg viability of the cattle tick *Boophilus annulatus* (Acari: Ixodidae). Exp. Appl. Acarol. 5: 1- 14.
- Davey, R.B y L.M. Cooksey. 1988. Sex ratios of *Boophilus* ticks (Acari: Ixodidae) reaching adulthood on cattle. J. Med. Entomol. 25: 82-84.
- Davey, R.B y L.M. Cooksey. 1989. Effects of prolonged exposure at low temperature on *Boophilus microplus* (Acari: Ixodidae). J. Med. Entomol. 26: 407-410.
- De Campos Pereira, M., M. Bahia- Labruna., M.P. J. Szabó y G. Marcondes-Klafe. 2008. *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* Biología, controle e resistência. MedVet Livros, São Paulo, Br. 169 p.
- Estrada-Peña, A. 2001. Climate warming and changes in habitat suitability for *Boophilus microplus* (Acari: Ixodidae) in Central America. Journal of Parasitology 87(5): 978-987.
- Estrada-Peña, A., C. Sánchez- Acedo., J. Quílez y E. Del Cacho. 2005. A retrospective study of climatic suitability for the tick *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* in the Americas. Global Ecology and Biogeography 14: 565–573.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

- Evans, D.E. 1978. *Boophilus microplus* ecological studies and tick fauna synopsis related to the developing cattle industries in the Latin American and Caribbean Region. Ph.D. Thesis. Cnaa/NE London Polytechnic (now Life Science Department, University of East London). United Kingdom. 283 p.
- Ford, A. 1999. Modeling the Environment. An introduction to System Dynamics Models of Environment System. ISLAND PRESS. USA. 395Pp.
- Grant, W.E., S.L. Marin y E.K. Pedersen. 2001. Ecología y manejo de recursos naturales: análisis de sistemas de simulación. San José, C.R.: IICA. Xiv, 340 p.
- Guisan, A y N.E. Zimmermann. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. Ecol. Model, 135: 147–186
- Hannon, B y M. Ruth. 1997. Modeling dynamic biological systems. Springer-Verlag New York, United States of America 395p
- Hitchcock, L. F. 1955. Studies on the non-parasitic stages of the cattle tick, *Boophilus microplus* (Canestrini) (Acarina: Ixodidae). Aust. J. Zool. 3: 295-311.
- IDEAM, IGAC, SINCHI, IAvH, INVEMAR; CORMAGDALENA y UAESPNN. 2002. Mapa de coberturas de la tierra, línea base (2000 - 2002), metodología CORINE Land Cover (escala 1:100.000).
- IDEAM 2008. Vulnerabilidad Capítulo 4. Segunda comunicación nacional ante la convención marco De las naciones unidas sobre cambio climático República de Colombia. 201 – 313 pp.
- IDEAM, PNUD, MADS, CANCELLERÍA. 2015. Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y temperatura para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones - Estudio Técnico Completo: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. 278 p. Bogotá, Colombia.
- Levins, R. 1966. The strategy of model building in population ecology. Am. Sci., 54: 421–431.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 2006. Cabezas de Bovinos. Disponible en: <http://sigotn.igac.gov.co/sigotn/reporteMapaNuevo.aspx?prmAlls=217%3b7%3b2006%3b1%3b0%3b0%3b390575%3bCabezas+Bovinos%3b>. Consultado en Marzo 2014.
- Mount. G.A., D.G. Haile., R.B. Davey y L.M. Cooksey. 1991. Computer Simulation of *Boophilus* Cattle Tick (Acari: Ixodidae) Population Dynamics. Journal of Medical Entomology. Vol. 28 (2): 223 – 240.

- Peña, A.J., B. Arce., M. A. Ayarza y C.E. Lascano. 2008. Análisis de las tendencias temporales en los valores de los elementos meteorológicos para la generación de escenarios locales de Cambio Climático en regiones montañosas tropicales. En: "Curso internacional sobre Ganadería y Cambio Climático: impactos y tecnologías innovativas en sistemas sivopastoriles para el desarrollo sustentable". Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNATA). Chachapoyas, Amazonas (Perú. Septiembre 16 a 19.
- Pickett, S.T.A., J. Kolasa y C.G. Jones. 1994. Ecological Understanding. The Nature of Theory and the Theory of Nature. Academic Press, New York, New York, USA
- Rivera, O.D. 2004. Altiplanos de Colombia. Altiplanos de la cordillera oriental, Altiplano Cundiboyacense 59 – 107 pp. ISBN. 958-961749-5.
- Rodríguez-Eraso N., J.D. Pabón-Caicedo., N.R. Bernal-Suárez y J. Martínez-Collantes. 2010. Cambio climático y su relación con el uso del suelo en los Andes colombianos. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Universidad Nacional de Colombia y Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación. Bogotá, D. C., Colombia. 80 p.
- Rojas, E., B. Arce., A. Peña., F. Boshell y M. Ayarza. 2010. Cuantificación e interpolación de Tendencias locales de temperatura y precipitación en zonas alto andinas de Cundinamarca y Boyacá (Colombia). Revista CORPOICA - Ciencia y Tecnología Agropecuaria. 11 (2): 173-182
- Sutherst, R. W., M. J. Dallwitz, K.B.W. Utech y J. D. Kerr. 1977. Aspects of host finding by the cattle tick, *Boophilus microplus*. Aust. J. Zool. 25: 159-174.
- Teel, P. D. 1984. Effect of saturation deficit on eggs of *Boophilus annulatus* and *Boophilus microplus* (Acari: Ixodidae). Ann. Entomol. Soc. Am. 77: 65-68.
- Teel, P.D., S. Marin y W.E. Grant. 1996. Simulation of host – parasite – landscape interactions: influence of season and habitat on cattle fever tick (*Boophilus* sp.) population dynamics. Ecological Modelling. 84: 19 - 30
- Teel, P.D., S. Marin., W.E. Grant y J.W. Stuth. 1997. Simulation of host – parasite – landscape interactions: influence of season and habitat on cattle fever tick (*Boophilus* sp.) population dynamics in rotational grazing system. Ecological Modelling. 97: 87 – 97.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Turner, M.G., H.R. Gardner y R.V. O'Neill. 2001. Landscape ecology in theory and practice. Pattern and process. Springer Science Business Media, Inc. USA. 400p

4. MODELO ESPACIALMENTE EXPLÍCITO DE LA GARRAPATA COMÚN DEL GANADO *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* PARA EL ALTIPLANO CUNDIBOYACENSE

Resumen

Explicar el resultado de la distribución de una especie generada por un modelo de nicho ecológico o de distribución de especies, involucrando procesos biológicos que permitan evidenciar los aspectos que favorecen o desfavorecen el establecimiento de dicha especie en una región dada. Se generó un modelo espacial parásito – hospedero, con base en la conceptualización del comportamiento de la dinámica de población de la garrapata común del ganado *Rhipicephalus (Boophilus) microplus*, desarrollado en el capítulo 2, utilizando el método por compartimentos. Se incorporó el componente espacial usando la técnica de modelos basados en agentes e individuos. Los resultados conducen a sugerir que, la distribución y presencia de *R (B) microplus* en el altiplano, está determinada por la presencia y desplazamiento de su hospedero el ganado bovino, más que por las características climáticas y ambientales de la región. La temperatura media, así como las condiciones de precipitación no cuentan con los valores óptimos requeridos para el desarrollo de *R (B) microplus*. El incremento o disminución de las densidades poblacionales en la región están influenciadas por la preferencia del hábitat, siendo las áreas con coberturas arbóreas las que mayores poblaciones albergan.

El Altiplano Cundiboyacense, puede llegar a ser una zona libre de garrapata si: **a.** se plantean programas rigurosos de manejo desde la llegada del ganado a la región; **b.** se generan estrategias de manejo donde no se permita el encuentro entre el ganado y el parásito. A pesar de que se plantea que el cambio climático puede favorecer el desarrollo de este parásito en regiones nuevas y con mayor altitud como es el caso del altiplano cundiboyacense, este estudio contradice esta premisa, ya que las poblacionales de *R (B)*

microplus bajo las condiciones de temperatura y precipitación futuras, tienden a disminuir más que a aumentar.

Palabras clave. Modelos basados en agentes e individuos, dinámica de población espacial,

4.1. INTRODUCCIÓN

La garrapata de la fiebre del ganado *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* (en adelante *R (B) microplus*) es considerada una de las principales plagas de importancia médica, económica y veterinaria. Al ser un ectoparásito – hematófago, genera considerables lesiones en sus hospederos, que inician con la irritación dérmica del hospedero durante el proceso de alimentación de sangre, la que a su vez funciona como la entrada de agentes dañinos como *Babesia bovis*, y *Anaplasma marginale*, los cuales generan fuertes infecciones que a su vez producen enfermedades como, anemia, inapetencia y fuertes fiebres en el ganado. Por otro lado, cuentan con potencial zoonótico debido a su capacidad de servir como vectores de serias enfermedades de animales domésticos y silvestres (CORPOICA 2011).

R (B) microplus, cuenta con distribución mundial es de origen Indo – asiático. Sus preferencias de hábitat están asociadas a áreas con cobertura arbórea, como bosques, o mosaicos de pastos con bosques o cultivos (Teel *et al.* 1997); las áreas climáticamente adecuadas a esta especie, deben presentar temperaturas altas superiores a los 19°C hasta los 30°C, aunque su plasticidad fenotípica les permite sobrevivir en temperaturas inferiores con un límite crítico mínimo de 12°C (Mount *et al.* 1991 Teel 1984). La presencia de su hospedero principal, el ganado vacuno es un factor determinante para el desarrollo, no obstante, también puede utilizar hospederos alternos como el venado de cola blanca o ungulados de gran tamaño que les permite cumplir su ciclo de vida, debido a sus altos requerimientos de alimentación.

Estrada-Peña 2001, Estrada-Peña, *et al.* 2005, sugieren que la garrapata del ganado *R (B) microplus*, presenta una tendencia a aumentar su distribución altitudinalmente en el continente europeo, en Centro y Sur América, debido posiblemente al calentamiento global, ya que según lo planteado por estos autores el cambio y aumento de distribución de esta

especie, responde principalmente al aumento de la temperatura. El aumento de distribución altitudinal de la garrapata del ganado repercute en el manejo de los bovinos y la producción de leche afectando la cadena productiva económicamente y amenazando la seguridad alimentaria humana.

El conocimiento de la biología de esta garrapata es aún escaso en Colombia, el principal enfoque ha sido en observaciones y conteos de presencia de garrapatas sobre el ganado bovino, con algunos pocos estudios enfocados en ecología de poblaciones que evalúan los periodos de desarrollo de los estados vida libre de *R (B) microplus* (Thompson 1976, Evans 1978, López 1983, Mateus 1981, Benavides 1984, Benavides y Gonzáles 1986, Betancourt y Hernández 1990, CORPOICA 2011).

Estos estudios establecieron que la fase de estados de vida libre, se puede desarrollar entre 2 – 146 días promedio, y el periodo de duración depende de la región y el clima en donde se encuentre, ya que de acuerdo a lo observado en zonas cálidas y de bajas altitudes el periodo de esta fase de desarrollo es menor y viable, mientras que en zonas de mayor altitud se amplían los periodos para cada estado y proceso de desarrollo, por la disminución de temperatura. Con respecto a la fase parasitaria, se estableció que esta puede desarrollarse en un promedio de 21 días, independientemente de las condiciones ambientales. En regiones de temperaturas altas 28°C – 30°C promedio, *R (B) microplus* puede producir entre 5.4 y 5.7 generaciones al año, mientras que, en condiciones de temperaturas bajas menores a 20°C, el número de generaciones puede ser menor (Evans 1978, Benavides 1984). El Altiplano Cundiboyacense es una importante región montañosa y lechera de Colombia, que a pesar de contar condiciones ambientales poco adecuadas para el desarrollo de esta especie (Betancourt 2012); desde hace aproximadamente una década se han empezado incrementar las observaciones sobre su presencia a lo largo de la región. El desconocimiento del comportamiento y la biología de las poblaciones de *R (B) microplus* en esta área de distribución, conlleva a generar estudios que fortalezcan el conocimiento de la biología y ecología de esta especie localmente, que contribuyan y conlleven a un buen manejo del ganado con respecto al parásito. La información conocida sobre *R (B) microplus* en el Altiplano Cundiboyacense (Figura 1) se enfoca principalmente a los estados de vida libre, con evidencias recientes de eclosión en altitudes superiores a los 2500 m, lo cual en años anteriores no era viable (Cortés-Vecino *et al.* 2010, Betancourt 2012).

El objetivo de este trabajo fue describir la dinámica de población de la garrapata *R. (B.) microplus*, mediante el desarrollo de un modelo espacialmente explícito, basado en individuos, de carácter estocástico, que permita evaluar el desarrollo de la población de *R. (B.) microplus* incluyendo condiciones locales de clima, configuración del paisaje, el movimiento, densidad y resistencia del hospedero (*Bos taurus*) de una importante región montañosa del centro de Colombia.

4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

La estructura metodológica general del modelo se adaptó de Mount *et al.* (1991), con datos ambientales locales de la región de estudio el Altiplano Cundiboyacense y la conceptualización del capítulo del modelo por compartimentos (Figura 24), la cobertura espacial de paisaje utilizada fue la máscara del Altiplano Cundiboyacense desarrollada para el modelo de distribución de especies (Figura 13). Para este capítulo, se incorpora el componente espacial, mediante el uso de la cobertura temática de la configuración del paisaje de la región de estudio en formato ráster, el movimiento del ganado y el desarrollo de la garrapata en cada celda del ráster.

4.2.1. Descripción del Modelo

La descripción del modelo se desarrolla de acuerdo al Protocolo ODD (Grimm *et al.* 2006, Grimm *et al.* 2010, Railsback y Grimm 2011). El protocolo ODD por su sigla en inglés (Overview, Design, Details), es el método estandarizado establecido para presentar y comunicar los resultados de los trabajos desarrollados por la técnica de los modelos basados en agentes e individuos. El protocolo contiene diferentes elementos para cada uno de sus componentes Overview, Design y Details, que permiten describir y facilitar la escritura del desarrollo del modelo en sus diferentes fases (Tabla 1).

La técnica de modelos basados en agentes e individuos, representa las propiedades de los sistemas a partir del comportamiento adaptativo de los individuos, los cuales son tratados como entidades autónomas y discretas (Railsback y Grimm 2011). Se enfoca en la caracterización de las partes discretas de las entidades mediante reglas de

comportamiento, de tal manera que dichas entidades interaccionen entre ellas y con el ambiente en el que se encuentran (Ginovart *et al.* 2012).

La incorporación del espacio en esta técnica es el componente innovador que motiva el uso y aplicación de la misma para el presente estudio. El espacio funciona como un tipo de modelamiento continuo, que pasa por ecuaciones en derivadas parciales, limita el número de opciones relativas a movimientos individuales y que pueden interactuar en espacios multidimensionales (Vincenot *et al.* 2011, Givonart *et al.* 2012, Railsback y Grimm 2012, De Angelis y Grimm 2014).

Overview

Propósito

Se desarrolló un modelo estocástico basado en agentes e individuos, con el propósito de comprender la dinámica espacial y temporal de la garrapata común del ganado *R (B) microplus* en el Altiplano Cundiboyacense. El modelo que representa las condiciones del Altiplano cundiboyacense, el *home range* de *Bos taurus*, como especie hospedero de esta garrapata, los estados de desarrollo del parásito y la configuración del paisaje de la región (Figura 34).

Se simuló la dinámica temporal y espacial del hospedero, representado en densidad (individuos/ha.), la estructura de la población de *R (B) microplus*, la interacción parasito-hospedero mediante la infestación para todos los estados del ciclo de vida de *R (B) microplus* y su expresión espacial y explícitamente modelada. El modelo se calibró con datos de paisaje (hábitat) y clima del Altiplano cundiboyacense (descritos más adelante en los *insumos*).

Este trabajo surge de preguntarse, sí, es posible generar un modelo espacial de la dinámica poblacional de una especie, que pueda explicar su distribución a partir de la representación de procesos ecológicos, de tal manera que contribuya a complementar el resultado obtenido en la modelación de nicho ecológico, que cuenta con vacíos en este sentido ya que asume como supuestos los procesos ecológicos de las especies, pero no los incluye en su desarrollo.

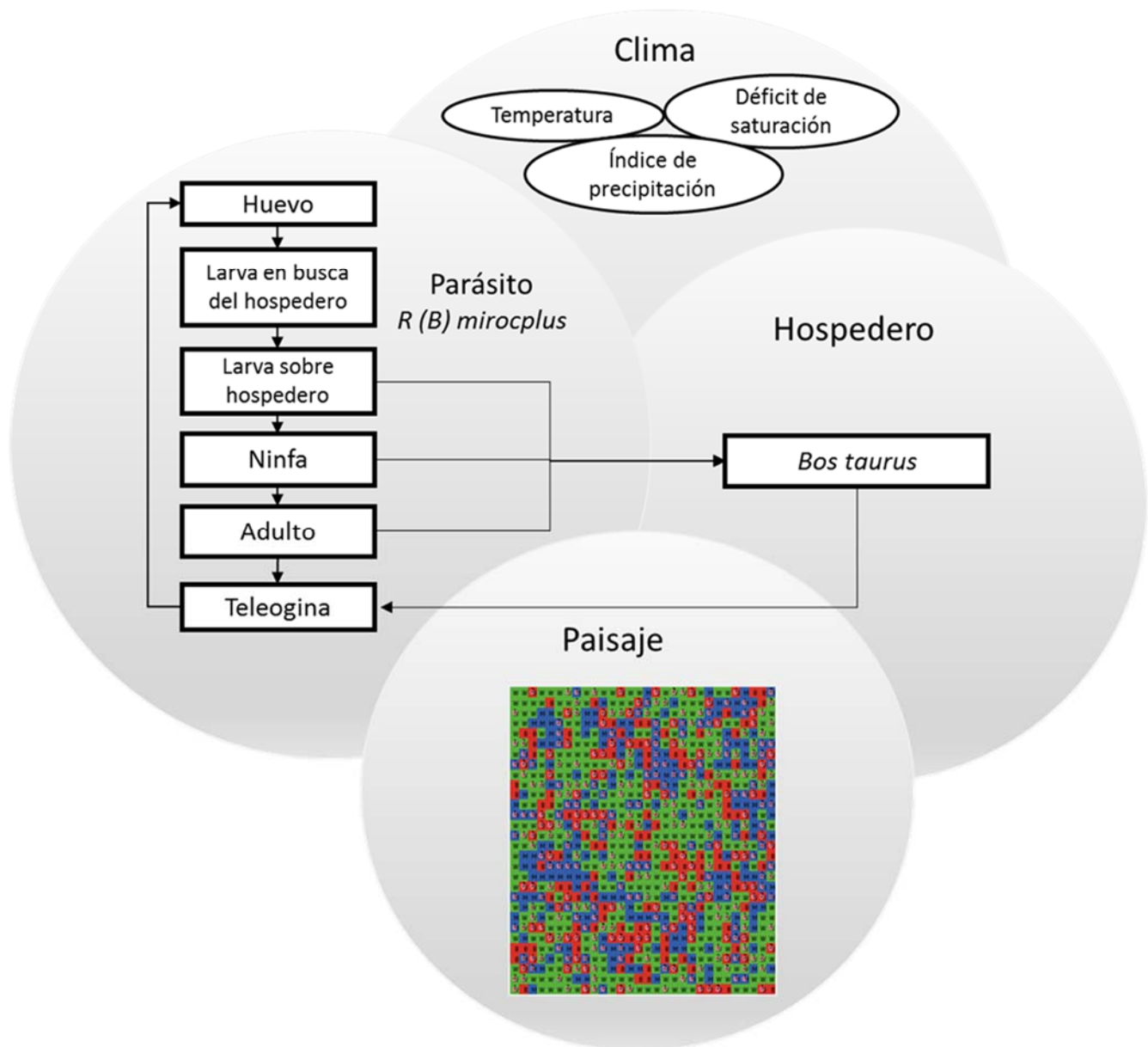


Figura 34. Modelo conceptual que representa la interacción entre las condiciones de clima, la estructura del paisaje, el hospedero y la garrapata del ganado *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* para el Altiplano cundiboyacense. Adaptado de Wang *et al.* 2012.

Variables de estado, entidades y escala

El modelo contiene dos entidades: (1) hábitat, representado en un ráster con celdas de 30x30m de resolución, y (2) hospedero (Densidad, No. individuos/ha.). Las variables de estado del hábitat incluyen los siguientes atributos: una localización (coordenadas x, y), tipo de hábitat (bosques y mosaicos con algún tipo de cobertura arbórea; cultivos y herbazales; pastos y áreas abiertas), presencia del recurso agua (si o no) y número de individuos por cada etapa de desarrollo de vida libre del parásito (teleogina, huevo, larva en el ambiente), en cada tipo de edad o sobrevivencia, así como su ubicación en cada celda (Figura 35).

Las variables de estado del hospedero, incluyen atributos como, localización del rango de su actividad (coordenadas x, y del centroide), ubicación actual (coordenadas x, y), tamaño del rango de actividad (ha), máximo del número de garrapatas que puede soportar, así como número de larvas, ninfas y adultos que están cargando (estados parasíticos). Los atributos de las variables de estado pueden cambiar en el tiempo, número de larvas y teleoginas, en cada clase de edad (Sobrevivencia), en cada celda de hábitat y número de larvas, ninfas y adultos sobre cada hospedero (Tabla 9). El modelo se actualiza 30 veces por semana para los estados de desarrollo del parásito, excepto para el número de huevos en cada edad y en cada celda de hábitat, que lo hacen solo una vez por semana.

Las variables globales representan las condiciones ambientales de temperatura media anual (°C), déficit de saturación de vapor (mm/Hg) y un índice de precipitación (cm), (Anexo 2), las cuales fueron actualizadas semanalmente para un periodo de nueve (9) años.

La escala espacial se estableció a partir del área real del altiplano cundiboyacense, la cual cuenta con aproximadamente 1.955.060 ha, mediante el uso de un ráster dividido en 20.782 celdas de 30x30m (Figura 36), se tuvieron en cuenta estos parámetros ya que permiten una adecuada representación de condiciones espaciales más cercanas a la realidad de la región, de tal manera que se pudiera observar comportamiento de la garrapata en el altiplano y la aplicación del modelo bajo un escenario más cercano a la realidad, tanto espacial, como ambientalmente.

La escala temporal se estableció para nueve (9) años divididos en intervalos semanales, de acuerdo a Mount y Haile 1987 y Wang *et al.* 2012, los intervalos semanales permiten reproducir de manera apropiada los efectos de las condiciones ambientales (clima – heterogeneidad del paisaje) sobre los estados del ciclo de vida libre, además de la fluctuación estacional en las densidades de la población.

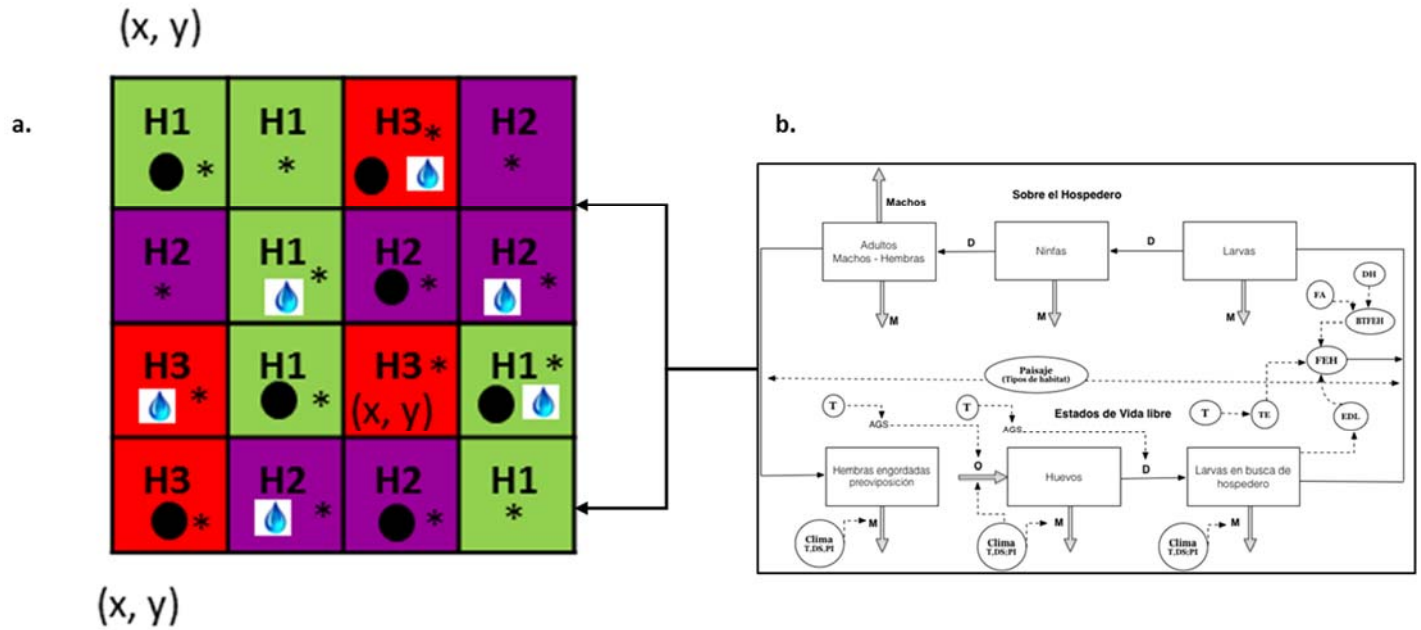


Figura 35. Resumen de entidades, variables de estados y escala, del modelo. H1, H2, H3, se refieren a los tipos de hábitat, el punto negro hace referencia al hospedero, el asterisco representa al parásito (*R (B) microplus*), la gota de agua representa la presencia del recurso agua y, (x, y) representan las coordenadas de localización. a. Cuadrícula para descripción de configuración del paisaje, agentes y entidades; b. conceptualización de los procesos del ciclo de vida de *R (B) microplus*, que se ejecutan en la cuadrícula en cada una de las celdas de hábitat que componen el paisaje.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Tabla 9. Lista de variables de estado, atributos y escala, definidos para el modelo de población de *Rhipicephalus (Boophilus) microplus*, en el Altiplano Cundiboyacense. Niveles jerárquicos, entidades, variables de estado y atributos incluidos en el modelo.

Entidad	Variables de estado	Atributo
Hábitat	Ubicación	Coordenadas (x,y), posición en las celdas del ráster
	Tipo de cobertura	bosques y mosaicos con dosel, cultivos y herbazales, y pastos y áreas abiertas
	Estados del ciclo de vida	Contienen o no agua
	Hembras engordadas	establecido para definir estado de sobrevivencia
	Huevos	Sobrevivencia 1 -Mínima u óptima duración del estado
		Sobrevivencia 2 - máxima duración del estado
	Larvas en busca de hospedero	Sobrevivencia 1 -Mínima u óptima duración del estado
		Sobrevivencia 2 - máxima duración del estado
	Larvas sobre hospedero	Sobrevivencia 1 -Mínima u óptima duración del estado
		Sobrevivencia 2 - máxima duración del estado
	Ninfas sobre hospedero	Sobrevivencia 1 -Mínima u óptima duración del estado
		Sobrevivencia 2 - máxima duración del estado
	Adultos	Sobrevivencia 1 -Mínima u óptima duración del estado
		Sobrevivencia 2 - máxima duración del estado
Hospedero	Tamaño del rango de actividad	0.1 ha
	Centro de rango de actividad	(x,y)
	Preferencias de hábitat	entre 0, 1 para cada tipo de hábitat
	Ubicación	Parche de hábitat
	Estados del ciclo de vida (Larvas, ninfas, adultos sobre hospedero)	
	Máximo Número	Número máximo de individuos por estado sobre hospedero (larva, ninfa y adulto)
	Mínimo número	Número mínimo de individuos por estado sobre hospedero (larva, ninfa y adulto)

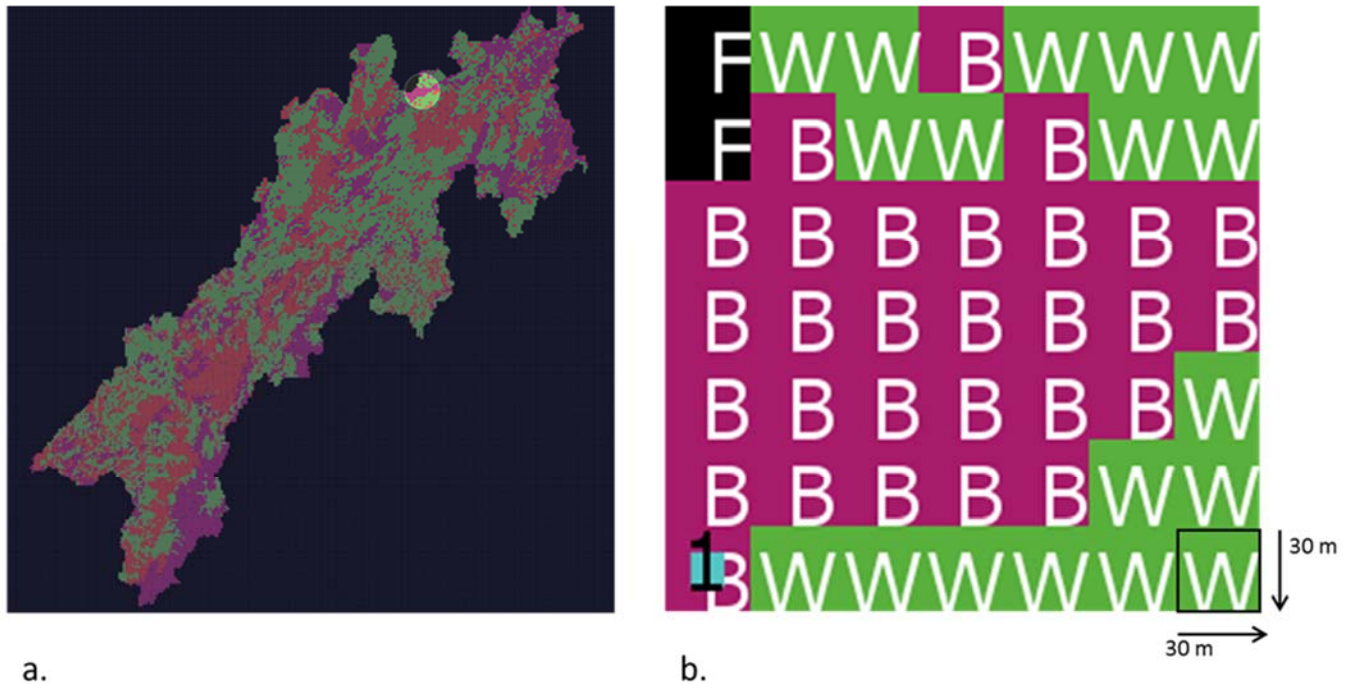


Figura 36. Representación de la escala espacial del altiplano cundiboyacense en el modelo.
a. Ráster del altiplano cundiboyacense utilizado en el software de modelamiento NetLogo 5.2.0. **b.** Corte de una porción de la región que permite observar el tamaño de las celdas del ráster 30x30m. **W** se refiere al hábitat adecuado; **B**, se refiere al hábitat medianamente adecuado; 1, representa el hospedero

Procesos generales y programación

La programación y la ejecución de las simulaciones fueron desarrolladas en NetLogo 5.2.0 (Wilensky, 1999); los resultados de la simulación fueron exportados a un archivo en formato Excel© (Microsoft 2007), para generar los análisis estadísticos y gráficas temporales. La visualización de patrones espaciales, se realizó mediante el software ArcGis 10.1 (ESRI 1999 – 2014).

Durante cada simulación, el programa inicia el sistema cargando las coberturas GIS (el ráster de la región), creando la estructura del paisaje y del hospedero, para luego, introducir los valores de las series de tiempo de las condiciones climáticas, y los valores de la densidad del hospedero (Figura 37 – Figura 38). A continuación, de forma iterativa el programa ajusta para el primer intervalo de la semana, las condiciones climáticas y calcula los cambios en el número de huevos, larvas, y teleoginas en cada clase de edad en cada

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

celda de hábitat en respuesta a los cambios en la temperatura, el déficit de saturación, y el índice basado en la precipitación. Luego, para cada intervalo de tiempo, el programa recalcula los cambios semanales y anuales en las variables climáticas, así como el cambio del número de larvas y teleoginas en cada clase de edad (Sobrevivencia S_1 , S_2) en un hábitat dado, en respuesta a la dispersión, es decir la colección de larvas disponibles por parte del hospedero en una celda hábitat dada y la caída de teleoginas en la misma celda o en otra, de otro lado, los cambios en el número de larvas, ninfas y adultos en cada hospedero resultan de la mortalidad y el desarrollo de dichos estados sobre el hospedero. La recolección de garrapatas de cada hábitat por parte del hospedero se lleva a cabo dentro de su rango de actividad y depende de la abundancia de larvas en el ambiente y la proporción de tiempo de permanencia del hospedero en cada una de las celdas de hábitat que visita y de acuerdo a su preferencia de hábitat. Las garrapatas depositadas por el hospedero en cada celda de hábitat dentro de su rango de actividad dependen de la proporción de tiempo invertido en las diferentes celdas. En cada intervalo de tiempo durante la simulación de los nueve años, el programa monitorea el número total de huevos, larvas y teleoginas en cada hábitat del sistema, además de la media (\bar{X}), el máximo y el mínimo número de larvas, ninfas y adultos sobre el hospedero. Se asume el movimiento como máximo una ha, con respecto al vecino más cercano, en todas las direcciones posibles.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

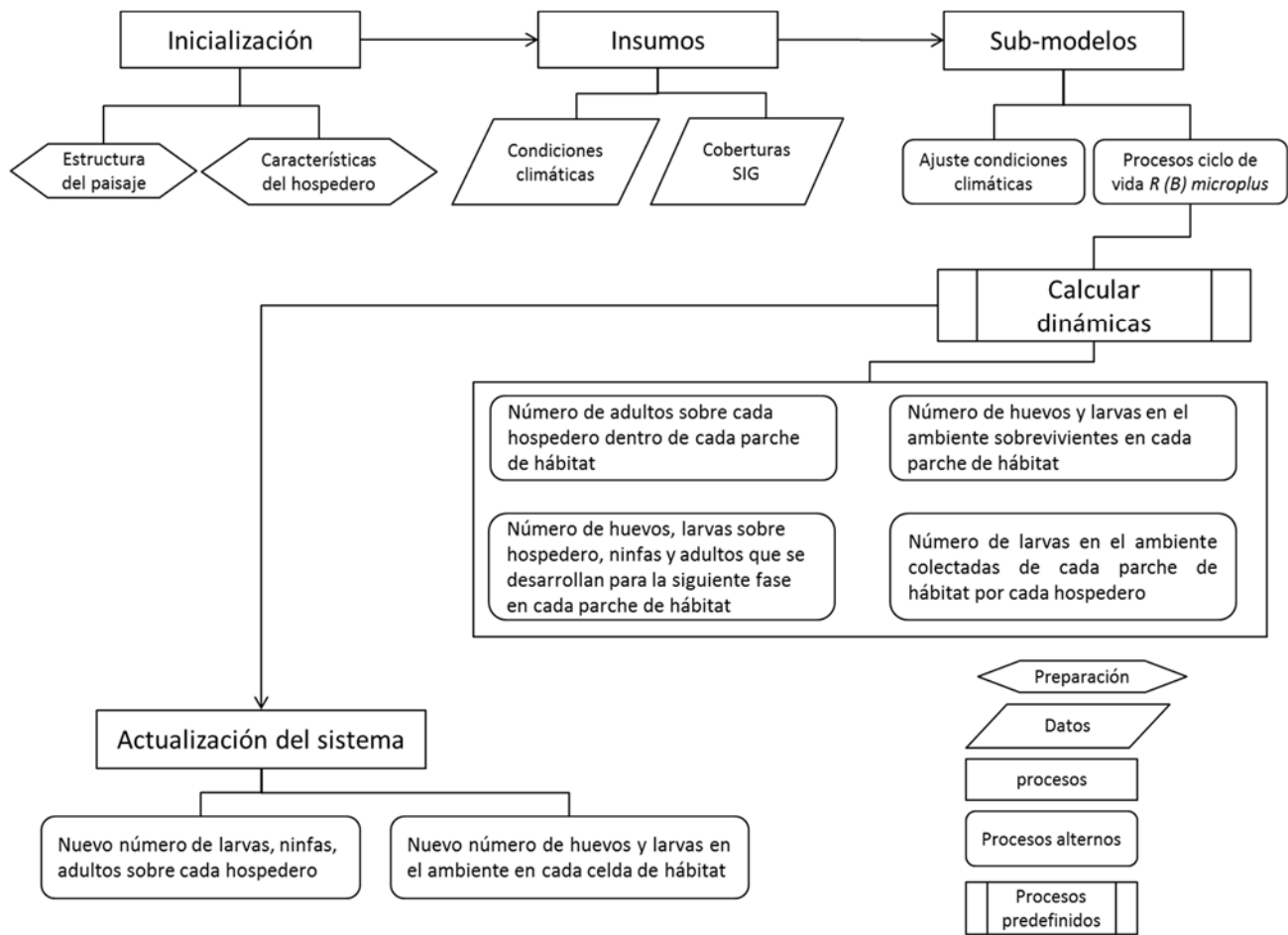


Figura 37. Resumen de los procesos y programación del modelo espacial, para *R (B) microplus*, para el Altiplano cundiboyacense. Se representan los procesos consecutivos tenidos en cuenta.

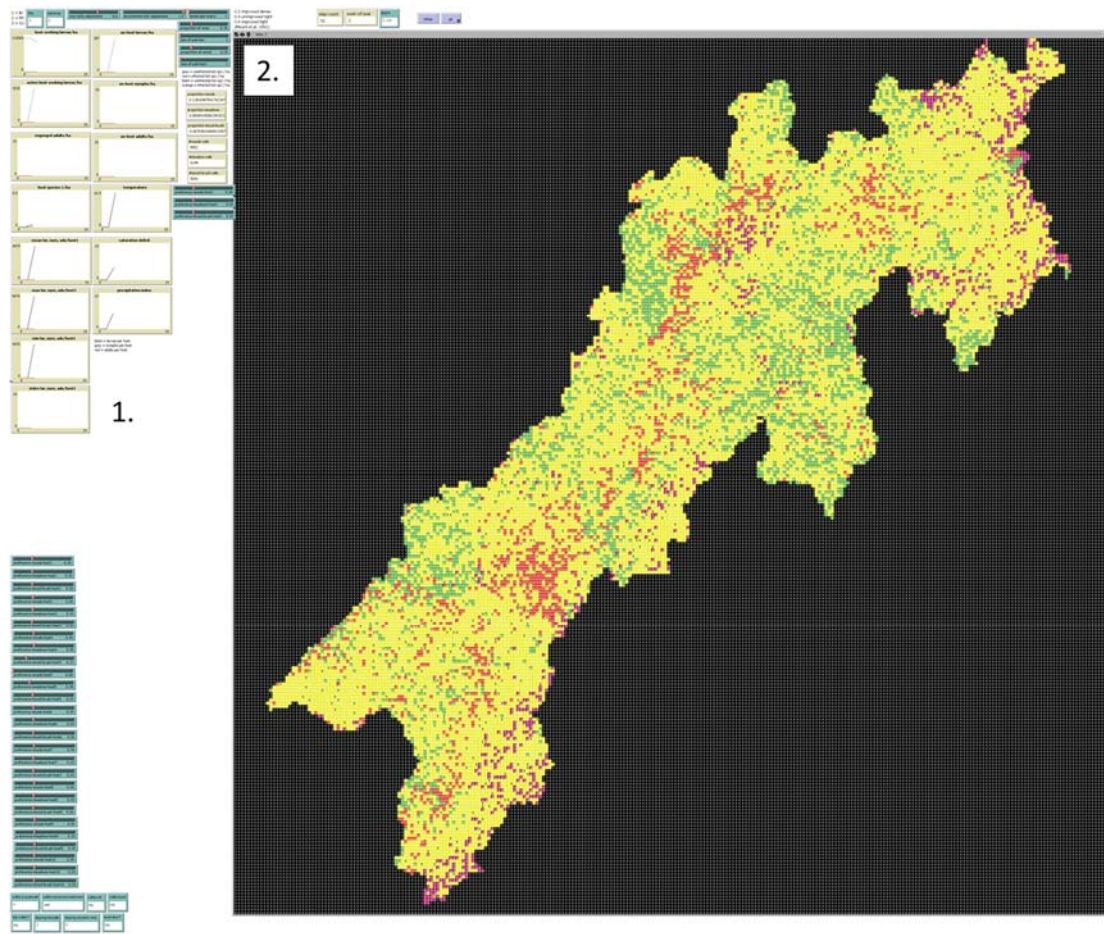


Figura 38. Interface de NetLogo donde se desarrollan los procesos de la dinámica de población de *R (B) microplus*. 1. Monitores que registran los cambios comportamentales de la población durante la simulación; 2. Mundo, espacio geográfico donde se desarrollan los procesos del ciclo de vida de *R (B) microplus*.

Conceptos de Diseño (Design concepts)

Principios Básicos: el principio básico abordado por este modelo es la dinámica de población de una especie de garrapata que desarrolla su ciclo de vida en dos fases, una fase de vida libre y una fase parasítica para la cual requiere un hospedero específico, el ganado vacuno de la especie *Bos taurus* (Figura 39). El modelo se aborda desde el concepto parasito – hospedero, en una región de alta montaña en Colombia.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Salida: La dinámica de población, surge desde los procesos de tasas de desarrollo parametrizadas para sobrevivencia de la garrapata, además de las reglas empíricas en función del uso del hábitat por parte del hospedero. También, emergen patrones espaciales y temporales de abundancia de las garrapatas para los diferentes estados de vida (teleoginas, huevos, larvas en busca del hospedero, larvas en el hospedero, ninfas, y adultos en el hospedero) como propiedades al nivel de sistema.

Estocasticidad: se utilizó para representar la selección de los rangos de actividad y la simulación de los movimientos del ganado que tiene componentes aleatorios, el cual, a su vez tiene un efecto aleatorio en la disponibilidad del hospedero para las garrapatas fuera del hospedero y la distribución de las teleoginas por el mismo, en tiempo y espacio, dentro de limitaciones impuestas por la estructura general del paisaje.

Detección: en el modelo, las celdas de cada hábitat son capaces de reconocer su tipo y manera como afectan las tasas de sobrevivencia de los huevos, las larvas fuera del hospedero y las teleoginas. El hospedero (*Bos taurus*), es capaz de reconocer la ubicación del centro de su rango de actividad, tamaño, y el máximo número de garrapatas que pueden cargar en un tiempo dado, lo cual afecta en un tiempo dado el número de larvas, ninfas y adultos de garrapatas que están cargando, así como la manera en la cual se redistribuyen espacialmente las garrapatas que ellos llevan.

Interacción: las interacciones que incluye en modelo se presentan de manera implícita entre las celdas de hábitat y los hospederos a través de la recolección y caída de las garrapatas en cada una de las celdas de hábitat que se encuentran dentro de los rangos de actividad de los individuos del hospedero.

Observación: se registraron valores semanales de número de huevos, larvas fuera del hospedero, teleoginas en cada hábitat y el número promedio en cada estado del ciclo parasítico: larvas, ninfas, y adultos sobre el hospedero.

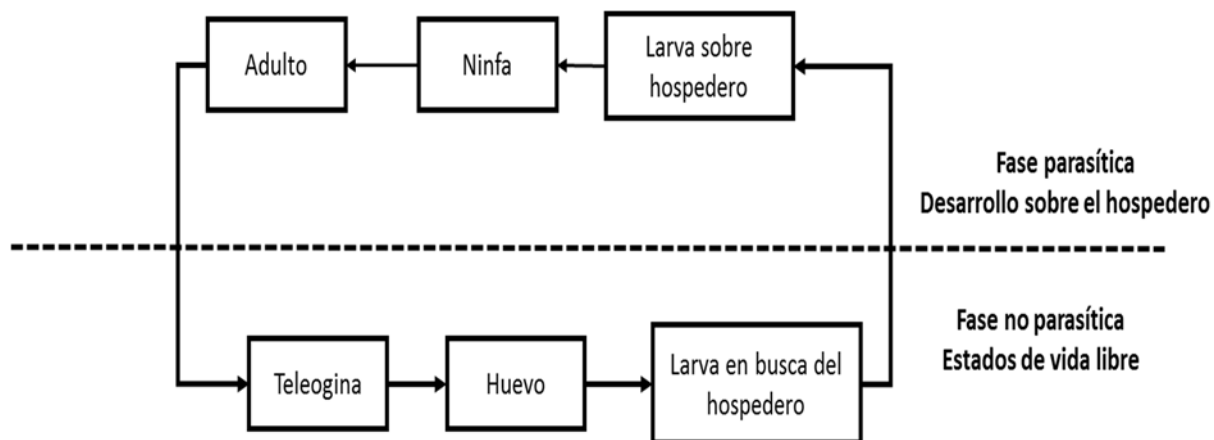


Figura 39. Ciclo de vida de la garrapata del ganado *R (B) microplus*.

Inicialización

Paisaje: Se programó el paisaje típico del Altiplano Cundiboyacense, representado por los tipos de hábitats característicos de la región agrupados en tres categorías, siguiendo la propuesta de Teel *et al.* (1996 y 1997); hábitats óptimos adecuados como los bosques y como los mosaicos de pastos, con cultivos y/o bosques, con 0.46 de proporción de área para la región; hábitats medianamente adecuados, como los arbustales y los herbazales, con el 0.24 de proporción de área; y hábitats no adecuados como los pastos abiertos y áreas abiertas sin ningún tipo de cobertura con el 0.3 de proporción de área

Hospedero: se incluye a *Bos taurus* como el hospedero principal de *R (B) microplus*, el cual se encuentra dentro del área de estudio, la línea base de la tasa de mantenimiento del hospedero a partir de su densidad 0.73/ha, esta se calculó a partir del inventario de cabezas de ganado, disponible para Colombia (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2006). Se asumió que la densidad del hospedero permanecería constante durante las simulaciones y que los rangos de actividad representan el tamaño de la actividad de cada individuo semanalmente.

Datos de Insumo

Se incluyeron, datos semanales de Temperatura media (°C), Déficit de saturación de vapor (SD) e Índice de precipitación, basados en la tendencia del clima en la región del Altiplano cundiboyacense para 30 años, 1981 – 2011 (CORPOICA 2012). Mapa temático de la

clasificación de tipos hábitat del altiplano cundiboyacense en formato ráster, calculados con base en la cobertura de usos de suelo Corin Land Cover 2002 (IDEAM *et al.* 2002).

Sub-modelos

Los submodelos de este capítulo, se fundamentan en el desarrollo conceptual Mount *et al.* (1991) y Sutherst *et al.* (1977) (Figura 24). En el nuevo enfoque aquí presentado, se incluye el componente espacial articulado con el paisaje, el movimiento del hospedero en el paisaje, y el desarrollo del ciclo de vida del parásito asociado a cada uno de estos elementos, con el fin obtener la representación espacial de la dinámica de población de la garrapata común del ganado en el altiplano cundiboyacense. El componente espacial de este capítulo toma gran importancia para este estudio, ya que se convierte un eje articulador con los resultados del modelo de distribución de especies obtenidos en el capítulo 2, puesto que contribuye a complementar dichos resultados desde el siguiente planteamiento: la representación espacial de la dinámica de población de *R (B) microplus* en el altiplano cundiboyacense obtenida por la metodología de MBI, incorpora procesos biológicos no los asume a modo de supuestos, como si lo hacen los modelos de nicho ecológico o distribución de especies. De otro lado, los MBI permiten observar la distribución de las densidades poblaciones de la especie junto con las áreas de mayor o menor densidad, lo que posibilita dilucidar cuales son las zonas de la región donde se puede establecer de mejor manera *R (B) microplus* en el altiplano. Con este procedimiento se pretende superar el limitante estático de los modelos de nicho ecológico y complementar sus resultados y análisis.

Ajuste de las condiciones climáticas y tasas de desarrollo y sobrevivencia asociadas

El programa ajusta, la temperatura, el déficit de saturación y el Índice de precipitación cada semana basado en los valores correspondientes a los datos de insumo. Las reglas de parametrización de las tasas de desarrollo y sobrevivencia se basaron en Mount *et al.* (1991), donde la dependencia con respecto a las variables climáticas, se estableció mediante ecuaciones cuadráticas y curvas de ajuste (Anexos 1.1, 1.2, 1.3, 1.4.), que relacionan valores óptimos, y umbrales críticos máximos y mínimos en cada estado de desarrollo, y para cada uno de los periodos de sobrevivencia (Tabla 5).

Denso independencia - Fase de estados de vida libre

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Se establece el efecto de la temperatura sobre los periodos de desarrollo de huevos y de teleoginas (preoviposición y ovoposición); donde se determina que, para avanzar de un estado a otro debe haber una acumulación de grados semanal (AGS), que les permita alcanzar el nivel requerido para completar su desarrollo de lo contrario mueren. El programa recalcula las tasas de desarrollo y sobrevivencia de estos estados, basado en las condiciones ambientales y biológicas (paisaje, clima, hospedero) establecidas para la región y de esta manera estima: i. el número de huevos, de larvas en el ambiente y de teleoginas en cada celda de hábitat en la que debería sobrevivir, ii. el número de huevos y larvas en cada celda de hábitat en la que continuará a su siguiente estado de desarrollo, iii. número de hembras engordadas en cada celda de hábitat que podrán depositar huevos, iv. número de larvas fuera del hospedero que podrían encontrar y adherirse al hospedero en cada celda de hábitat, y v. número de adultos sobre el hospedero (alimentándose de sangre) que llega a cada celda de hábitat (Figura 35).

Como último estado en el ambiente, las larvas en busca del hospedero dan la entrada al siguiente proceso del sistema, que es la adherencia al hospedero el cual se determina por la tasa del factor de encuentro (FEH), proceso que está dado partir del efecto de la temperatura (ET), la densidad de las larvas en el ambiente (DLA) y una base de tasa de encuentro con el hospedero (BTFEH), que se calcula a partir de una relación exponencial, como función de la densidad del hospedero (DH). Los coeficientes del efecto de la temperatura sobre el factor de encuentro, se desarrollaron a partir de ecuaciones cuadráticas y curvas de ajuste, utilizando el valor de la media del factor de encuentro óptimo y puntos críticos por encima y debajo del valor óptimo; mientras que la relación de la densidad de las larvas con el FEH, fue calculada mediante una ecuación logarítmica, y de esta manera reflejar como evita a las larvas el ganado, por último, el FEH es aplicado para larvas mayores a una semana (Anexo 1.4).

Procesos de la fase parasítica; movimientos, recolección y caída de garrapatas

Las tasas de sobrevivencia sobre el hospedero están dadas por el tipo de ganado, las cuales son constantes generadas específicamente para la especie *Bos taurus*, de acuerdo al nivel de resistencia desarrollado para *R (B) microplus*, definido para cada estado del ciclo de vida parasítico. Las estimaciones de estos valores se desarrollaron para tasas máximas

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

y mínimas de sobrevivencia semanal (Mount *et al.* 1991), lo cual corresponde a umbrales de exposición para cada estado del ciclo de vida de esta fase, los niveles de los umbrales fueron estimados entre 1.000 – 15.000 y que fueron constantes entre los estados del ciclo de vida (Anexos 2a, 2b. 2c).

Con respecto al movimiento del hospedero en el paisaje, se programó de tal manera que cada individuo del hospedero ejecute 30 movimientos (número aleatorio) sobre su rango de actividad cada semana, colectando y depositando garrapatas en cada celda de hábitat que visita. Las celdas visitadas por el hospedero son seleccionadas probabilísticamente basadas en la proporción y preferencia de los tipos de hábitats dentro del rango de actividad del individuo. El ganado debe retornar a la celda de hábitat que contiene agua, tres veces durante cada semana.

Al llegar a una celda el hospedero tiene una probabilidad de recolectar garrapatas lo cual depende de la abundancia de las larvas en el ambiente, este proceso se asocia al Factor del encuentro con el hospedero FEH ya descrito en el sub-modelo de Denso independencia, junto con el parámetro de superficie de área expuesta para garrapatas (1,22) que se basa en el radio de circunferencia del hueso metacarpo, además del límite de capacidad de carga del número de garrapatas por hospedero establecida en 15.000 individuos en un momento dado (Sutherst *et al.* 1986).

Con respecto al proceso de deposición o caída de garrapatas en cada celda de hábitat visitada, se estableció que el 0,1 de proporción de las garrapatas que han sobrevivido sobre el hospedero, se han alimentado lo suficiente para convertirse en teleoginas (por un periodo de al menos tres semanas) y son depositadas en una celda dada; la proporción de caída establecida representa la variación del tiempo de desarrollo. De este modo, la caída de las teleoginas es el resultado de la recolección de una larva de una celda de hábitat dada durante la visita de un individuo del hospedero, esta caída se da en un curso de 30 movimientos potenciales

resultante en cada celda de hábitat, inicia la recolección de las larvas fuera del hospedero en una celda de hábitat dado y durante una única visita del hospedero son depositadas en el curso de 30 cambios representados potencialmente en 30 celdas de hábitat diferentes.

Después de cada movimiento del hospedero el número de larvas recientemente adquiridas es registrado y reajustado al número de larvas en busca de hospedero de la celda de hábitat visitada. Lo propio se hace con el número de hembras engordadas recientemente depositadas en la celda de hábitat donde se registra el ajuste correspondiente que se hace al número de garrapatas adultas sobre el hospedero, las cuales se encuentran alimentándose de sangre.

4.2.2. Calibración y Evaluación del modelo

Se realizó un análisis de sensibilidad introduciendo cambios en parámetros sensibles del modelo, de tal manera que se pudiera evaluar si existen cambios consecuentes de las poblaciones para todos estados de desarrollo de la garrapata, bajo diferentes condiciones. Se realizaron pruebas no paramétricas para establecer, sí, se presentaban diferencias entre los valores modificados del factor de encuentro con el hospedero (BTFEH) en el modelo, para lo cual se aplicó una prueba de Kolmogorov-Smirnov, que tiene como ventaja la medición de las diferencias existentes entre las frecuencias relativas acumuladas de dos muestras, por lo que se detectan diferencias no sólo en la tendencia central, sino también en la dispersión y forma, es decir, la simetría y el apuntamiento de las muestras. (Guisande *et al.* 2011). Se realizó esta prueba estadística no paramétrica, ya que los datos no cumplían con los supuestos de normalidad e igualdad de varianzas; el intervalo de confianza fue, $P \leq 0,05$. Las pruebas fueron realizadas con el paquete SPSS Statistics para Windows, Versión 17.0. Chicago: SPSS Inc.

Los valores para análisis de sensibilidad se fundamentaron en la evaluación realizada en el modelo por compartimentos del capítulo 3, donde se asumió al BTFEH como el parámetro más sensible del modelo con un valor de línea base de 0.08, luego los cambios introducidos para este modelo fueron $0,07 < \text{BTFEH} < 0,08 > 0,09$. Se realizaron variaciones en la densidad del hospedero (DH) siendo 0.73 la línea base y manteniendo la línea base del factor de encuentro, por lo tanto $0,5 < \text{DH} < 0,73 > 1$. Por último, se realizaron cambios en las proporciones de los tipos de hábitat ya que son la expresión del paisaje de la región, donde se incrementó la proporción del hábitat de pastos y áreas abiertas a aproximadamente 0.70, se generó un paisaje con proporciones similares para los hábitats de pastos y áreas abiertas (36) y para los hábitats de coberturas arbóreas. Los análisis de DH y Paisaje, se realizaron manteniendo el valor de línea base de BTFEH (0.08).

4.3. RESULTADOS

Factor de encuentro con el hospedero (BTFEH)

Se observó que las densidades de poblaciones son similares para los diferentes estados de desarrollo. Las poblaciones de larvas y huevos de estados de vida libre para los tres valores del factor de encuentro presentan densidades semanales con valores máximos de 200.000 huevos para los tres factores y 150.000 para larvas para los estados de vida libre (Figura 40a); con respecto a los estados parasíticos, se mantienen los valores máximos semanales 250 individuos para larvas, 100 para ninfas, y entre 50 -100 para adultos sobre el hospedero (Figura 40b), se observa que las disminuciones poblacionales se presentan finalizando cada año es decir hacia la semana 52. Las teleoginas al igual que los otros estados, presentan densidades poblacionales similares, no hay variación significativa entre un valor de tasa de encuentro y otro, ya que se observa para los tres factores de encuentro el valor máximo no supera los 400 individuos de teleoginas a lo largo de la simulación (Figura 41). Lo anterior es soportado por la prueba de Kolmogorov-Smirnov, donde para los estados de vida libre no se presentaron diferencias significativas con valores de p entre 0,97 a 0,99, lo cual conduce a aceptar la hipótesis de igualdad de las medias (Figura 42). Con respecto a los estados parasíticos, se presentaron diferencias significativas entre el BTFEH 0.07 y 0.08 con $p=0.0266$, lo cual condujo a aceptar la hipótesis de no igualdad para estos valores; mientras que para el BTFEH 0.09 y 0.08 de este mismo estado de desarrollo, no se presentaron diferencias significativas con $p=0.1529$ (Figura 43). Por otro lado, debido a que los datos de ninfas y adultos sobre el hospedero presentaron un agrupamiento denso, no se pudieron aplicar las pruebas estadísticas para ellos.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

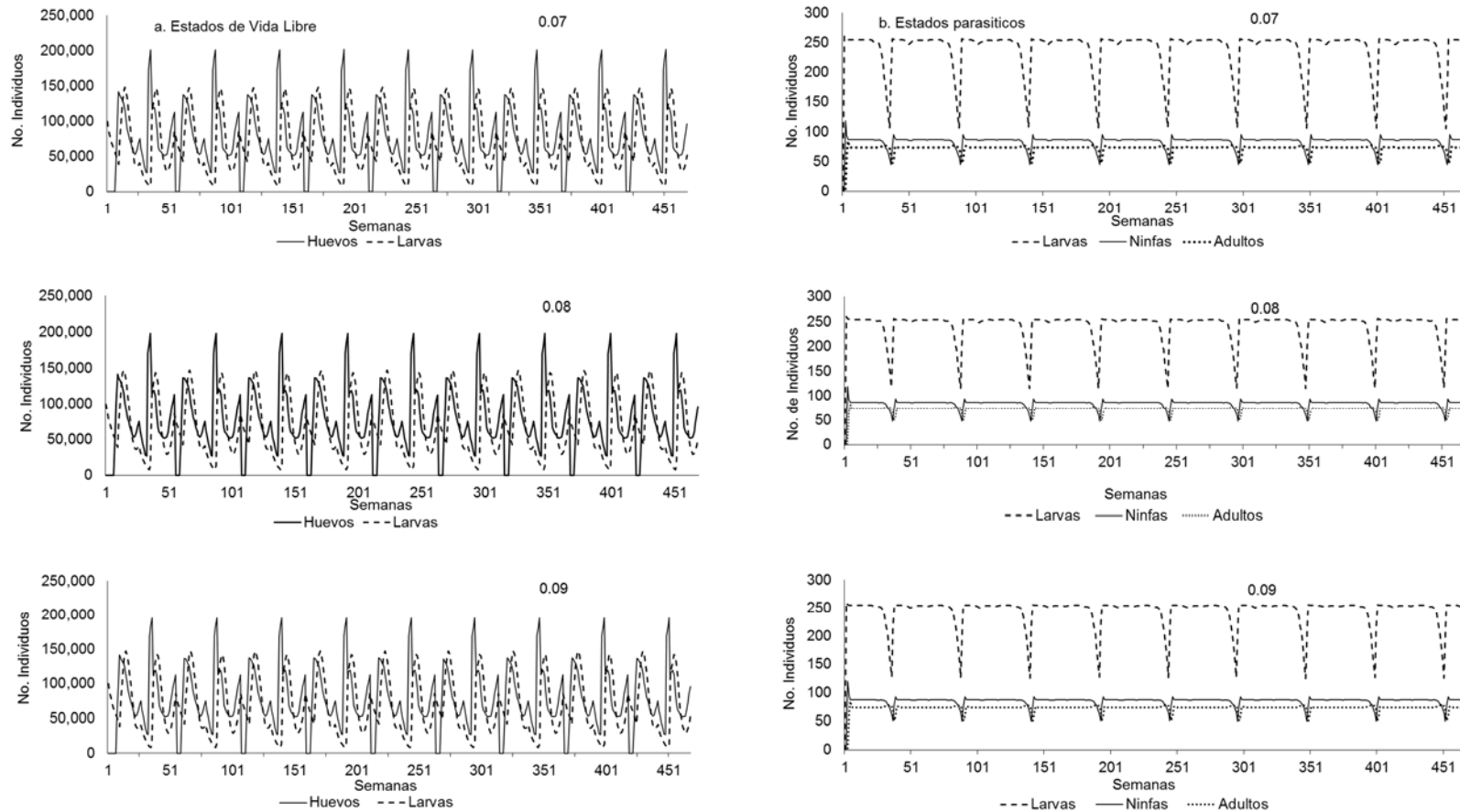


Figura 40. Simulaciones de la densidad de población de los estados de vida libre (a), huevos y larvas, y de los estados parasíticos (b), larvas sobre el hospedero, ninfas y adultos, bajo tres valores diferentes de tasas del factor de encuentro con el hospedero, en el Altiplano cundiboyacense.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

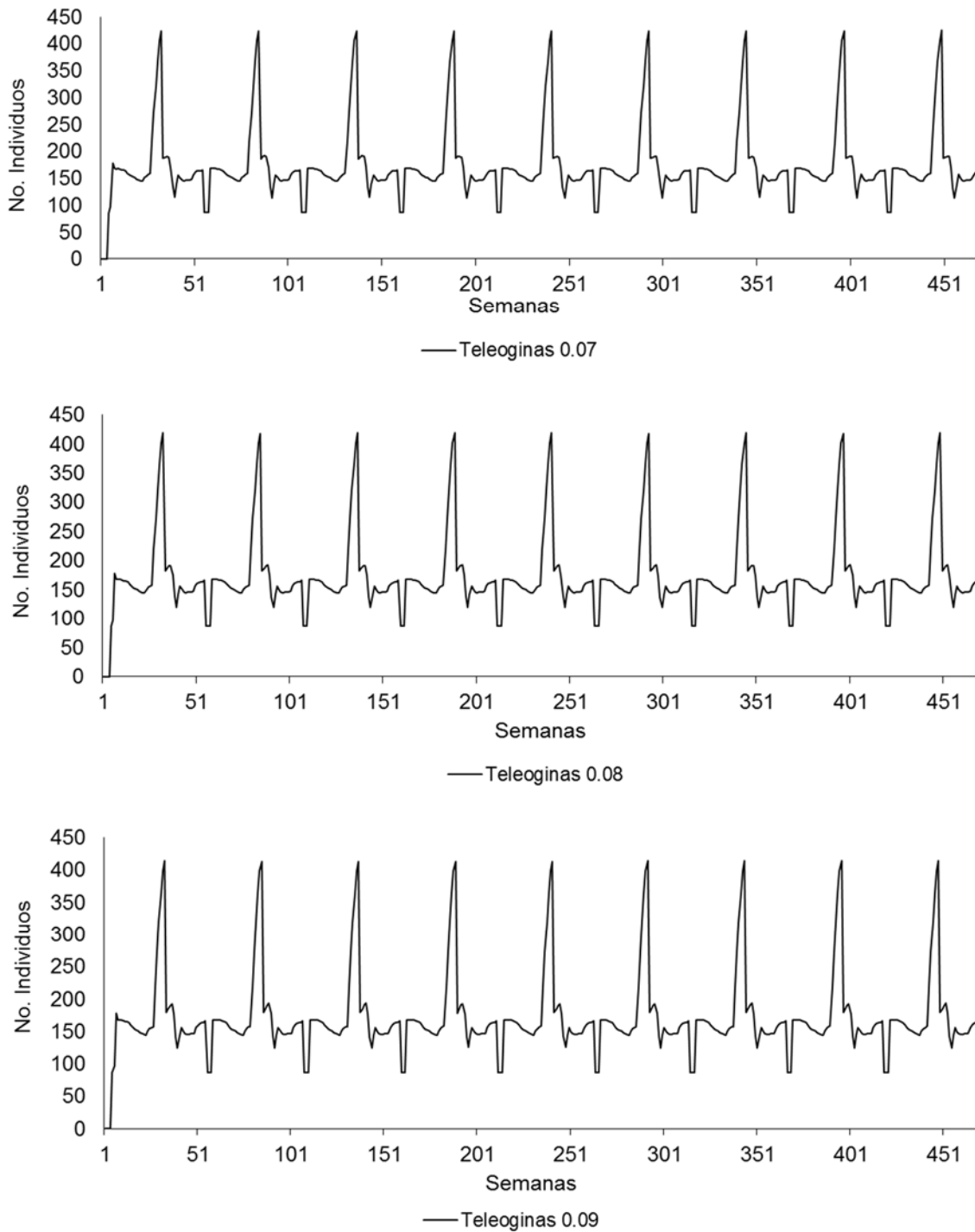


Figura 41. Simulaciones de la densidad de población de Teleoginas bajo tres valores de tasas de encuentro con el hospedero, en el Altiplano Cundiboyacense.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

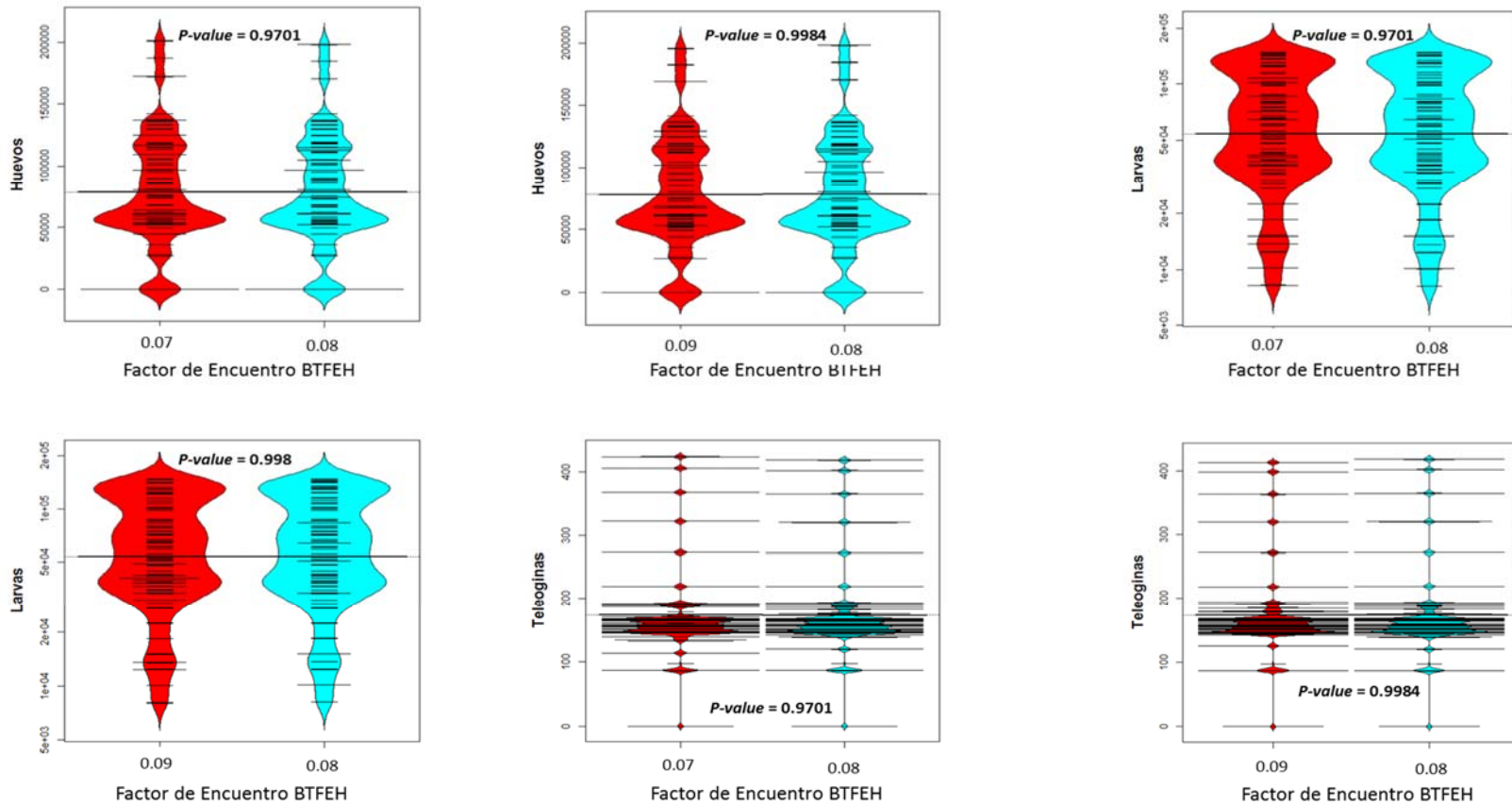


Figura 42. Resultados de la distribución, y prueba de significancia Kolmogorov-Smirnov para los estados de vida libre (huevo, larvas, teleoginas) bajo los tres factores de tasa de encuentro con el hospedero (BTFEH) evaluados (0.07, 0.08, 0.009). Se utilizó un intervalo de confianza $p = \leq 0.05$, se observa no existen diferencias significativas entre los factores para los estados de vida libre con $p = 0.97 - p = 0.998$.

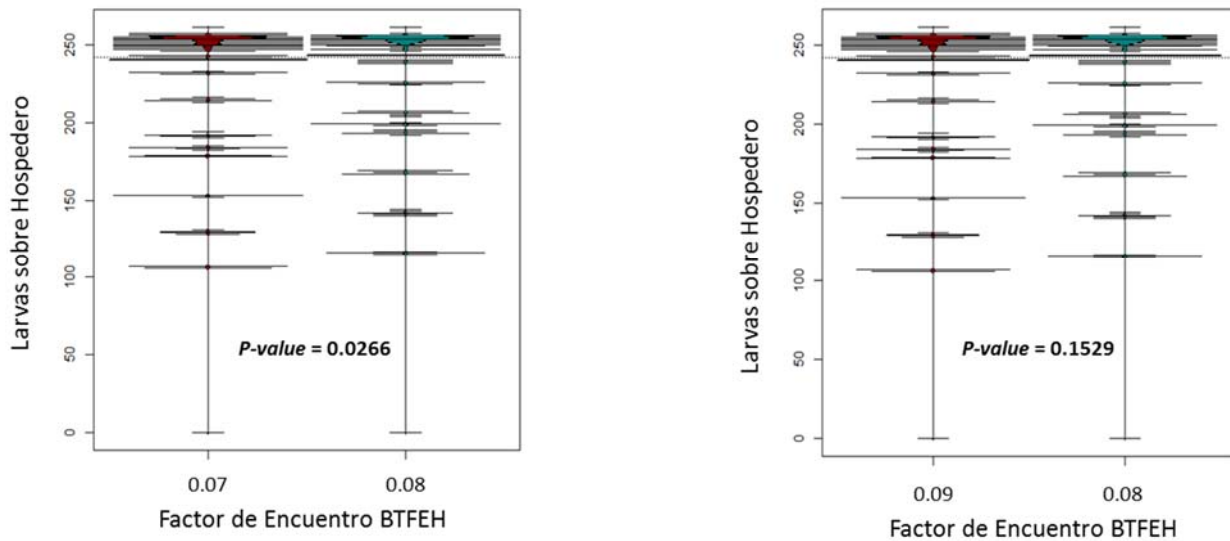


Figura 43. Resultados de la distribución, y prueba de significancia Kolmogorov-Smirnov para los estados de vida parasíticos (larvas sobre el hospedero) bajo los tres factores de tasa de encuentro con el hospedero (BTFEH) evaluados (0.07, 0.08, 0.009). Se utilizó un intervalo de confianza $p \leq 0.05$, se observa existen diferencias significativas entre los factores 0.07 y 0.08 con $p = 0.0266$, mientras que para 0.09 y 0.08 no se presentaron diferencias significativas con $p = 0.152$.

La distribución de las poblaciones de línea base (0.08) con respecto al hábitat, reflejó la preferencia de los estados de vida libre hacia las áreas de coberturas arbóreas, ya que las mayores densidades se encuentran asociadas a este tipo de hábitats. Densidades de huevos superiores a 2.000.000 de individuos se encuentran asociadas a las coberturas arbóreas (Figura 44a); densidad de larvas superiores a 1.300.000 individuos se encuentran asociadas a coberturas arbóreas (Figura 44b), y densidades de teleoginas superiores a 5.000 individuos se encuentran asociadas a las coberturas arbóreas (Figura 44c).

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

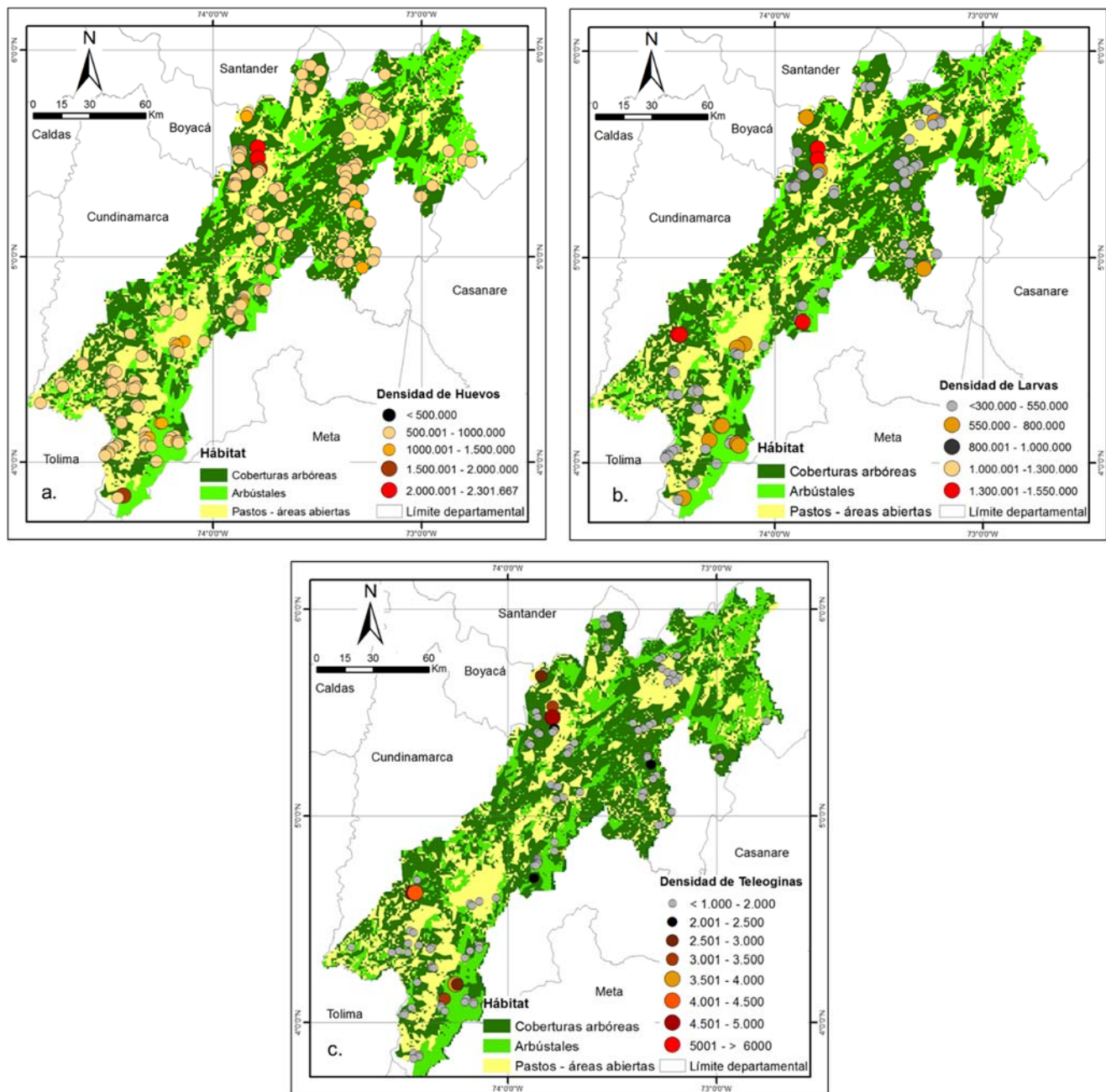


Figura 44. Distribución espacial de la densidad poblacional de los estados vida libre, huevos, larvas y teleoginas. a. huevos, b. larvas, c. teleoginas. La distribución se encuentra relacionada con los tipos de hábitat, presentándose las mayores densidades poblacionales en hábitat con características arbóreas.

Densidad del Hospedero (DH)

Los diferentes valores de hospedero, afectan la densidad de todos los estados de desarrollo de *R (B) microplus*, ya que se observa que a mayor densidad del hospedero mayor densidad de la garrapata, sea cual sea el estado de desarrollo. El incremento de DH a 1 produce un aumento con respecto a la línea base (0,73) de aproximadamente 50.000 individuos para las poblaciones de huevos y larvas y 150 individuos de teleoginas semanalmente (Figura 45a, Figura 45b, Figura 46). Para los estados parasíticos se observa que el que el incremento se presenta principalmente en el estado de las larvas, con aproximadamente 100 individuos más con respecto a la línea base, los estados de ninfa y adulto aumentan limitadamente (Figura 45a).

La reducción de DH a 0.5, deriva en reducción de las poblaciones de los diferentes estados de desarrollo con respecto a la línea base, para larvas y huevos en el ambiente se observó una disminución entre 100.000 y 50.000 individuos respectivamente (Figura 44c), mientras que para teleoginas la reducción de la población semanal fluctuó entre 100 y 150 individuos con respecto a la línea base (Figura 46).

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

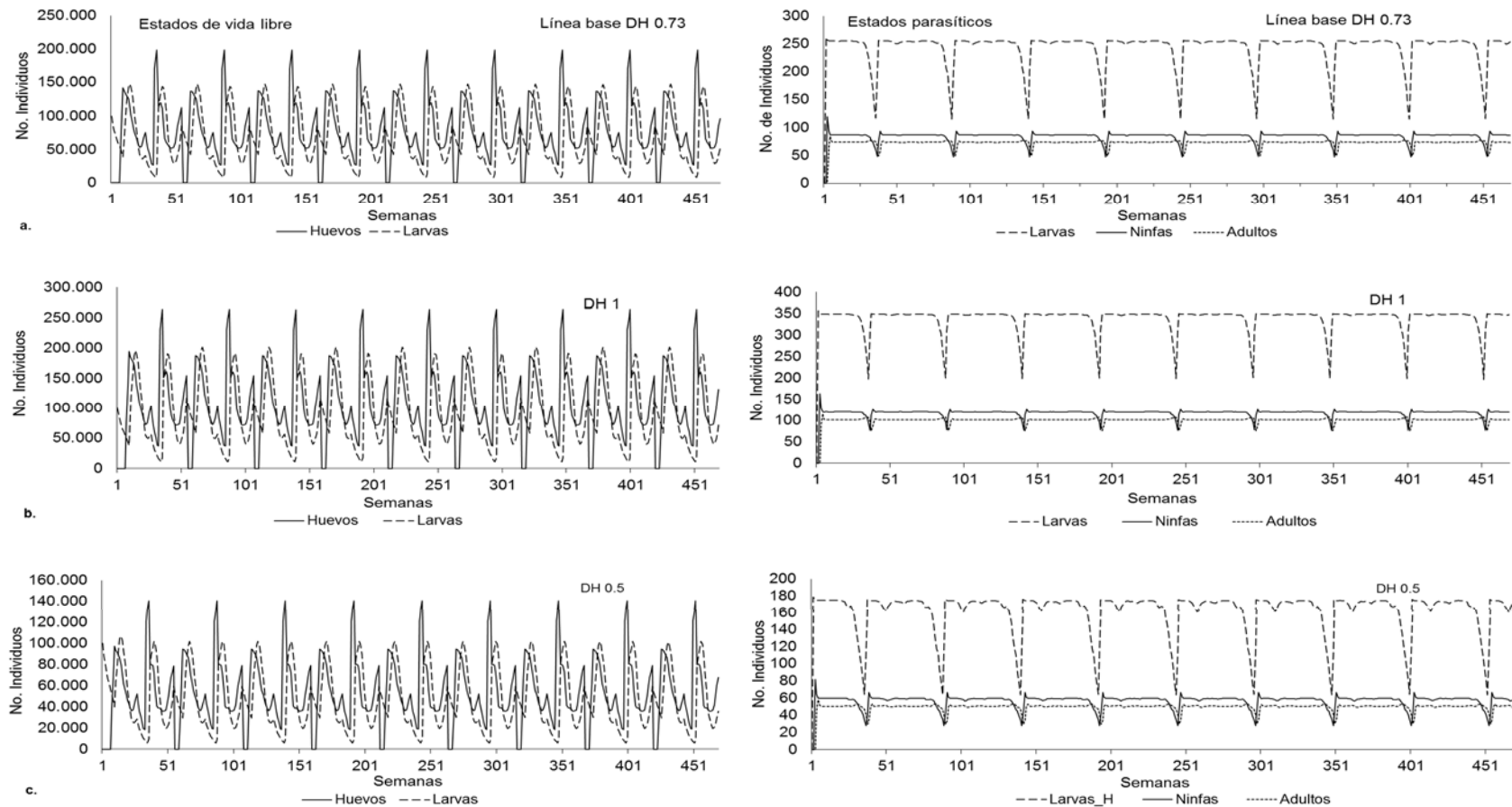


Figura 45. Densidades poblacionales de larvas, huevos, larvas sobre el hospedero, ninfas y adultos sobre el hospedero, de acuerdo a la densidad del hospedero 0.73 línea base, 0.05 escenario de disminución de la densidad de hospedero, y 1 escenario de incremento de densidad del hospedero. La densidad poblacional de todos los estados de desarrollo, disminuye bajo el escenario de disminución, mientras que, si se incrementa la densidad del hospedero, las poblaciones del parásito aumentan. a. Línea base de densidad del hospedero; b. escenario de aumento de la densidad del hospedero a 1/ha; c. escenario de disminución del hospedero a 0,5/ha.

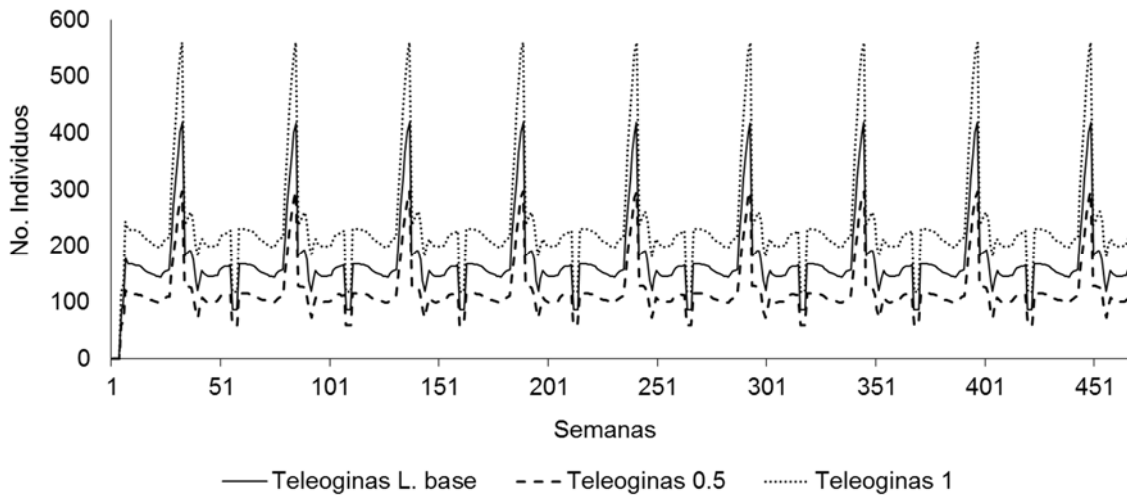


Figura 46. Densidades poblacionales de teleoginas, de acuerdo a la densidad del hospedero 0.73 línea base, 0.05 escenario de disminución de la densidad de hospedero, y 1 escenario de incremento de densidad del hospedero. La densidad poblacional de este estado de desarrollo, disminuye bajo el escenario de disminución, mientras que bajo el escenario de incremento del hospedero aumenta.

Cambios en el paisaje

Los escenarios de paisaje no afectan la densidad semanal de los estados de lavas y huevos y en el ambiente, manteniéndolas en densidades entre los 150.000 y los 200.000 individuos (Figura 47). Sin embargo, la distribución de las densidades cambia al cambiar la proporción de los hábitats, observándose que al aumentar la proporción de áreas del hábitat poco favorables *R (B) microplus* representado por los pastos y/o áreas abiertas, las poblaciones de los estados de vida libre (huevos, larvas, teleoginas) tienden a aumentar en el hábitat de arbustales, lo cual puede atribuirse a la baja disponibilidad del hábitat de coberturas arbóreas (Figura 48a- 48b - 48c), y a que las condiciones más similares a esos hábitats favorables en términos de protección podrían ser suplidas por los arbustales.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

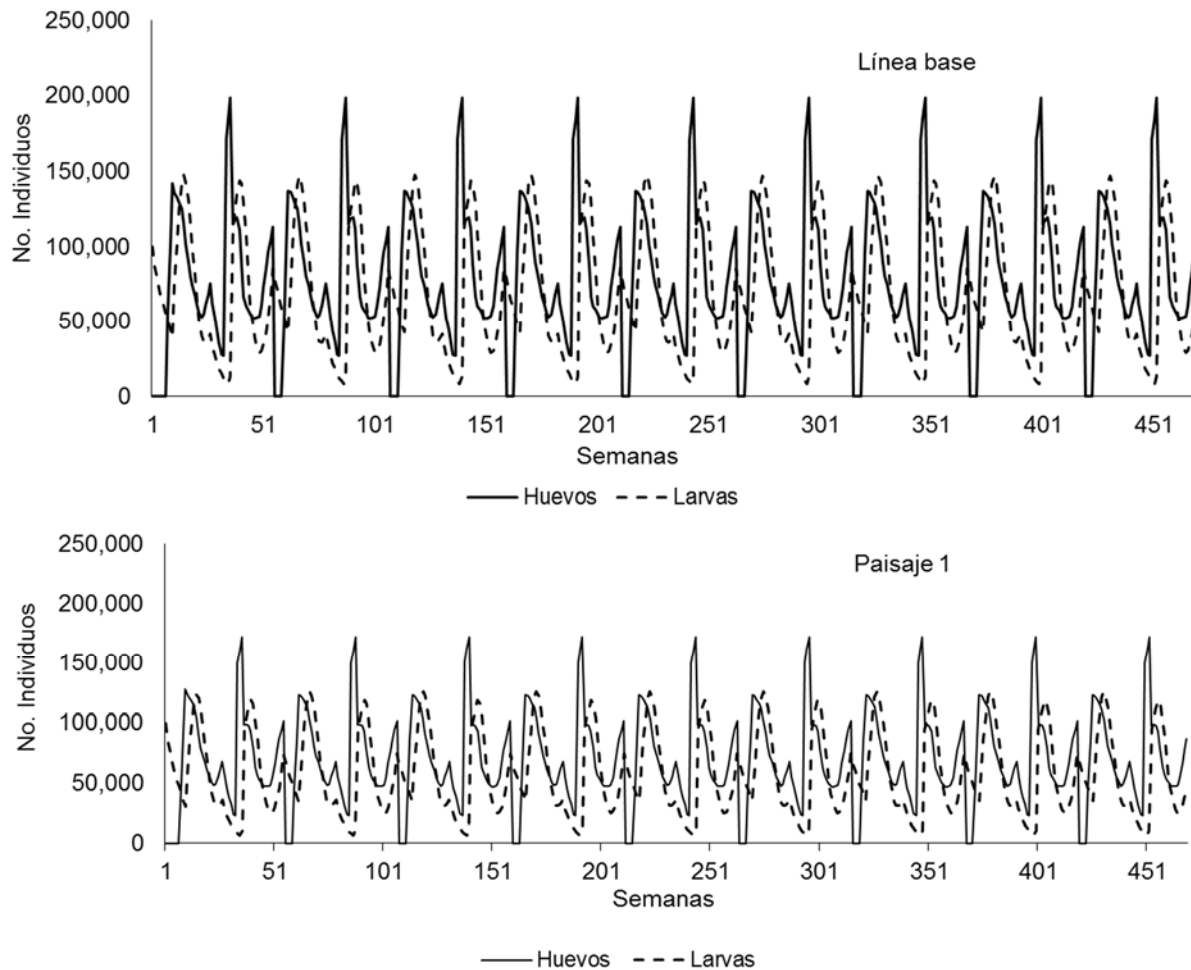


Figura 47. Densidades poblacionales de huevos y larvas, de acuerdo al paisaje y preferencias de hábitat, línea base es el paisaje “actual”, paisaje 1, se refiere al incremento al 70% de la cobertura de pastos y áreas abiertas. La densidad poblacional disminuye, si se incrementan las áreas de pastos y áreas abiertas y poco favorables para *R (B) microplus*.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

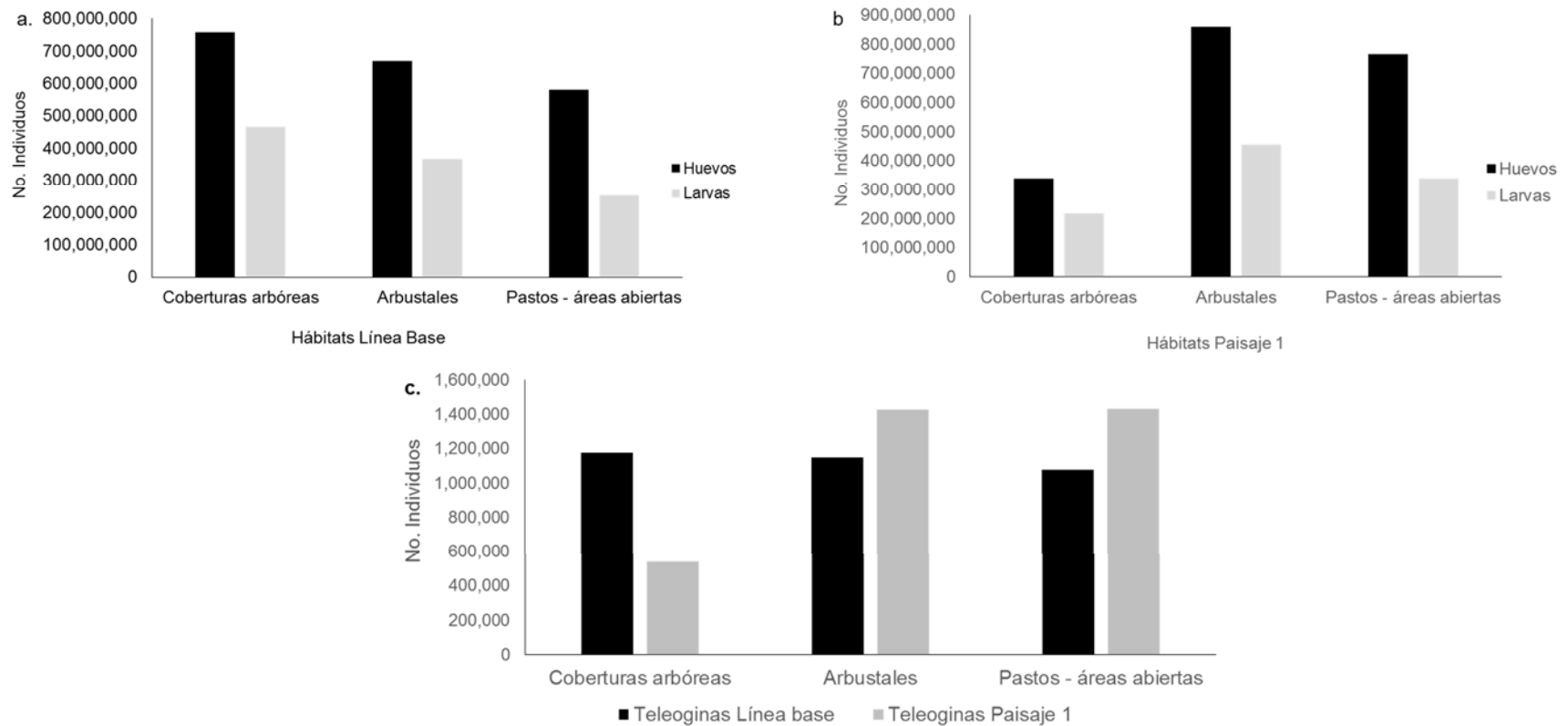


Figura 48. Densidades poblacionales de huevos y larvas y teleoginas, de acuerdo al paisaje y preferencias de hábitat, línea base es el paisaje “actual”, paisaje 1, se refiere al incremento al 70% de la cobertura de pastos y áreas abiertas. Se observa que, para el escenario de cambio, las poblaciones de huevos tienden a mantenerse con valores iguales en las áreas de pastos con respecto a la línea base, mientras que en las áreas de arbustales hay una tendencia a aumentar la densidad poblacional para estos estados de vida libre. A. escenario línea base; b. paisaje 1, reconfiguración del paisaje incremento al 70% de la cobertura de pastos y áreas abiertas; c. densidades poblacionales de teleoginas en los tres tipos de hábitats, bajos los dos escenarios de paisaje.

4.3.1. Aplicación del modelo

La aplicación del modelo se orientó hacia la variación del clima, sustentado en los modelos de cambio climático reportados para la zona del altiplano cundiboyacense (IDEAM *et al.* 2015) y descritos en el capítulo 3 de este estudio. La variación del clima consistió en incrementar en 6.2 el índice de precipitación de línea base y en 1°C la temperatura de línea base⁵.

Se observó que las poblaciones de los estados de vida libre, tienden a disminuir semanalmente bajo los valores de los escenarios de clima previstos en la región, para huevos y larvas, la disminución es de ≈ 50.000 individuos para los dos estados de desarrollo, al cambiar el clima (Figura 49a), para las teleoginas el cambio es más notorio, ya que se observa una reducción de 400 a aproximadamente 250 individuos (Figura 49b). De otro lado, las poblaciones de larvas y huevos presentan comportamientos irregulares con respecto a la estacionalidad bajo el escenario de cambio de clima, donde resalta la variación del estado de larvas, donde se observa una disminución de $\approx 2.000.000$ de individuos en sus picos máximos descendiendo desde $\approx 6.000.000$ a $4.000.000$ de individuos, y de $\approx 2.000.000$ a $< 1.000.000$ de individuos en su pico mínimos (Figura 49c); mientras que los huevos mantienen sus poblaciones en picos máximos de $\approx 5.000.000$ de individuos y el de sus picos mínimos entre $1.000.000$ y $2.000.000$ de individuos.

De otro lado, al variar independientemente la temperatura y la precipitación se observó que la temperatura con un grado más (1°C) impulsa el incremento de las poblaciones (Figura 50a), mientras que la precipitación puede reducir las poblacionales, huevos y larvas (Figura 50b).

⁵ Ver descripción del proceso de cambio sesión 3.2.6 aplicación del modelo.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

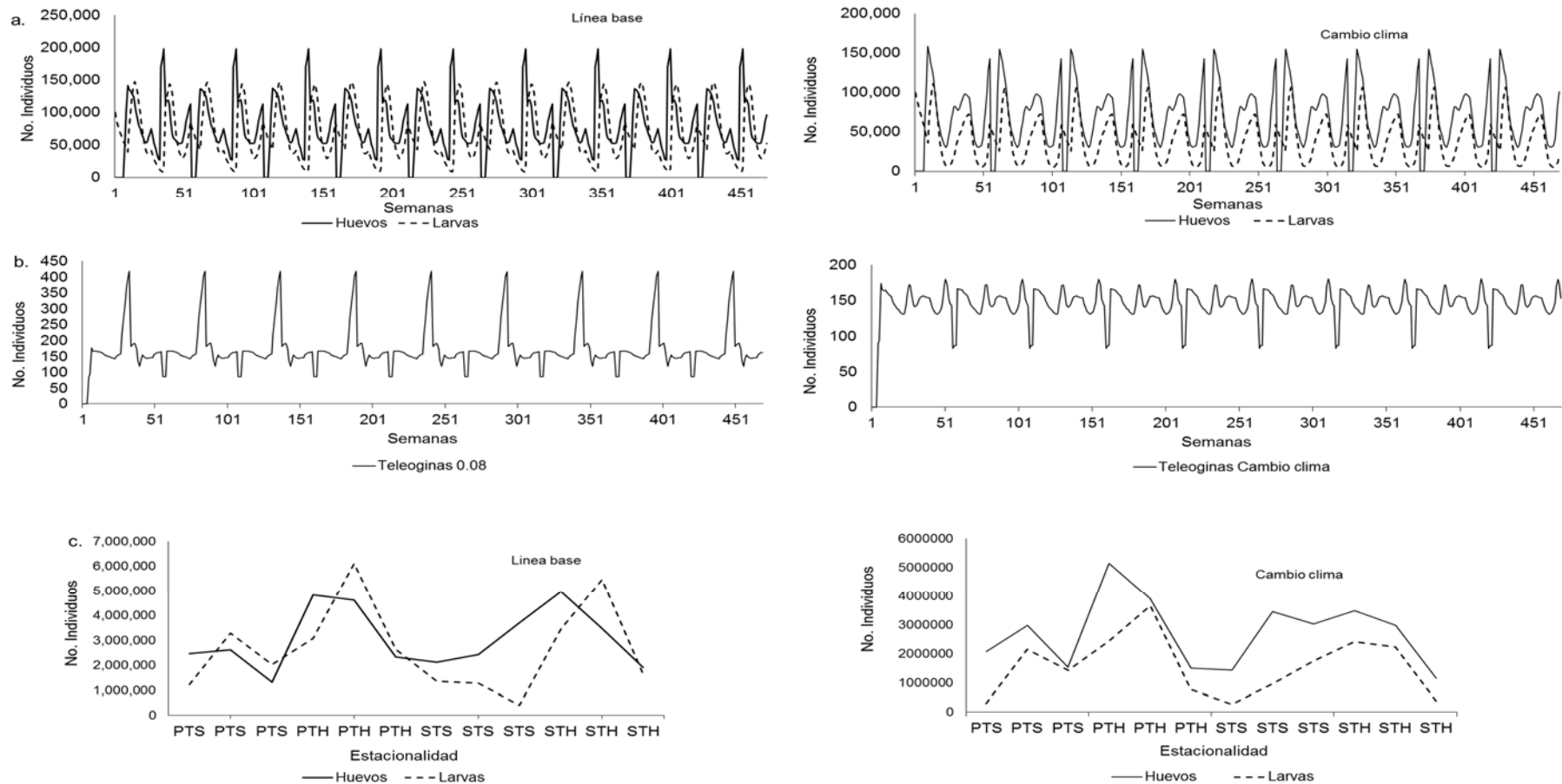


Figura 49. Densidades poblacionales de estados de vida libre, bajo los escenarios de cambio de clima. Se observa la disminución de las poblaciones de huevos, larvas y teleoginas bajo un escenario de cambio de clima para el 2011 – 2040 de acuerdo a los valores proyectados para temperatura y precipitación. a. Huevos y larvas para los dos escenarios de clima, línea base y proyección de los modelos de escenarios de cambio climático; b. teleoginas para los dos escenarios de clima, línea base y proyección de los modelos de escenarios de cambio climático; c. Comportamiento estacional de las poblaciones de larvas y huevos para los dos escenarios de clima, línea base y proyección de los modelos de escenarios de cambio climático. PTS: Primer semestre seco (diciembre- enero - febrero); PTH: Primer trimestre húmedo (marzo – abril - mayo); STS: Segundo trimestre seco (junio – julio - agosto); STH: Segundo trimestre húmedo (septiembre – octubre -noviembre).

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

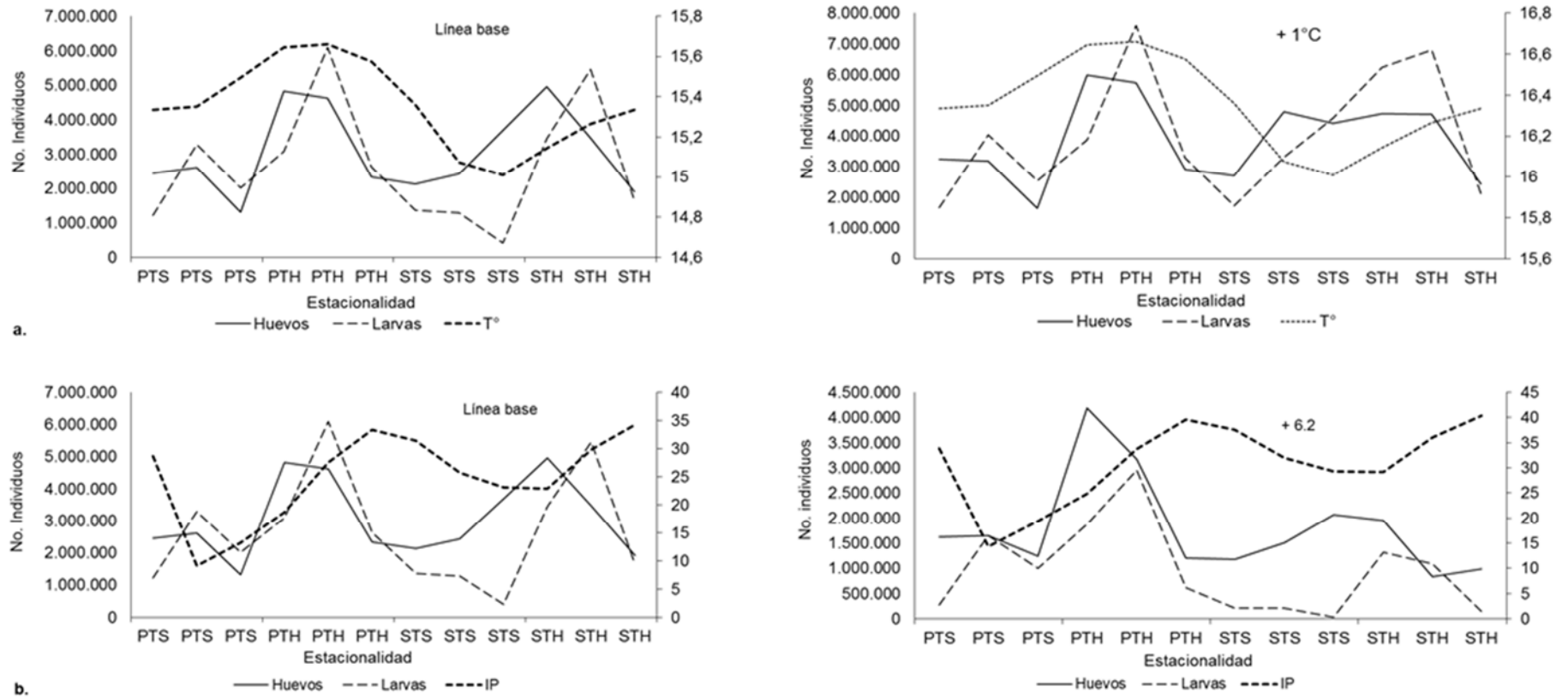


Figura 50. Densidades poblacionales de estados de huevos y larvas, con respecto a las variables climáticas de precipitación y temperatura de manera independiente. **a.** Escenarios de temperatura, línea base, incremento de 1°C. **b.** Escenarios de precipitación, línea base, incremento de 6,2.

4.4. DISCUSIÓN

La simulación de la dinámica de población de *R (B) microplus* para el Altiplano cundiboyacense ejecutada por el modelo espacial planteado en este capítulo, representó de manera coherente las principales características del comportamiento del ciclo de vida de esta especie, donde se incorporaron las relaciones, parasito - hospedero junto con el paisaje, el clima y el espacio bajo las condiciones propias de la región, tratando de apuntar a una representación lo más realista posible.

El análisis de sensibilidad con respecto al factor de encuentro con el hospedero, refleja que las densidades de las poblaciones para los diferentes estados de desarrollo, tanto de vida libre como parasíticos, se mantuvieron constantes durante un año y para los nueve años durante los cuales se realizó la simulación (Figura 40), lo que sustenta la no significancia estadística entre los BFEH utilizados para calibrar el modelo, encontrando *p value* entre 0,0266 – 0,1529 para estados de vida parasíticos (Figura 42) *p* entre 0,97 a 0,99 para estados de vida libre (Figura 43).

El papel de *Bos taurus* como hospedero exclusivo de este parásito, juega un rol importante no solo porque es el agente que permite concluir el desarrollo del ciclo de vida de *R (B) microplus*, sino porque es el medio de transporte de la garrapata entre hábitats evento que favorece la migración del parásito a lo largo de la región, así como de otras regiones hacia el Altiplano. Los cambios en la densidad del hospedero fueron directamente proporcionales a los cambios de las poblaciones de los diferentes estados de desarrollo (vida libre y parasíticos), observándose que el aumento de la densidad del hospedero produce un aumento de las poblaciones, mientras que la disminución de la densidad del hospedero produce una reducción en las poblaciones del *R (B) microplus* (Figura 43).

La evaluación del paisaje mediante la transformación de las proporciones de los hábitats presentes en el altiplano fueron coherentes en términos del comportamiento del parásito, donde se observan bajas poblaciones de huevos y larvas en áreas abiertas y pastos, con respecto a las áreas con coberturas arbóreas y arbustales, manifestándose en una pobre sobrevivencia de estos estados en dichos hábitats, de otro lado al aumentar los pastos y áreas abiertas a aproximadamente el 70% del total de la región, las poblaciones no sufrieron

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

cambios significativos con respecto a la línea base observándose que a lo largo de la simulación para los dos casos (línea base y transformación del paisaje), no se superan los 150.000 individuos (Figura 47 - Figura 48a). Además, se observa que las poblaciones de huevos y larvas prefieren los arbustales a pesar de que la región cuente como mayor proporción de pastos y áreas abiertas evidenciándose en el número de individuos (Figura 48b - 48c), ratificando la preferencia del parásito por áreas con algún tipo de cobertura vegetal sobre las áreas abiertas como los pastos, ya que así puede garantizar la continuidad de su ciclo biológico. Corson *et al.* (2004) y Wang *et al.* (2012), plantean que la disponibilidad de condiciones climáticas en las áreas de pastos no son las más adecuadas para el desarrollo de los estados de vida de huevos y larvas, donde la temperatura y el déficit de saturación (dado por la temperatura y la humedad relativa) afectan de manera negativa a los estados de vida libre, ya que específicamente las larvas se vuelven más sensibles a las condiciones de humedad que a la misma temperatura, resaltando la importancia del balance de agua en temperaturas altas, lo cual sustenta el hecho que las poblaciones de los estados de vida libre en las simulaciones resultantes para este estudio, desciendan notoriamente en los periodos secos y se incrementen en los periodos de lluvia en los tres tipos de hábitat (Figura 49a - 49b). Hoch *et al.* (2010), plantean que poblaciones de garrapatas en áreas de pastizales no podrían ser sostenibles en el tiempo a menos que sea por inmigración vía hospedero desde áreas boscosas. En las Figuras 44a, 44b y 44c, se presentan rangos de abundancias de los estados de vida libre con respecto a los tres hábitats definidos para el modelo, donde se puede observar que las áreas de pastos presentan los rangos con menor número de individuos (huevos < 500.000; larvas < 300.000 y teleoginas < 1000), mientras que los valores más altos de individuos se encuentran asociados a áreas de coberturas arbóreas y pueden convertirse en hábitats fuente de *R (B) microplus* para los pastos.

Las larvas en busca del hospedero y los huevos registraron dos picos de incremento asociados a los meses más húmedos del año (marzo, abril, mayo y septiembre octubre noviembre) y dos periodos de disminución asociados a los meses más secos del año (PTS: diciembre, enero, febrero – STS: junio, julio, agosto) (Figura 51a); las teleoginas presentan un único periodo de intensidad el cual se presenta en el segundo trimestre seco del año (junio, julio agosto) indicando que es la estación donde se puede presentar la mayor caída de garrapatas al ambiente y presenta una tendencia a descender hacia los meses húmedos

(Figura 51b). Aunque en la fase parasítica no se presentó la misma intensidad de brotes y abundancias que en la fase de vida libre, se observó que en las transiciones de épocas secas a húmedas inicia el incremento de las poblaciones de larvas sobre el hospedero, lo cual lleva a deducir que las mayores infestaciones de garrapatas sobre el ganado se estarían iniciando en los meses de febrero – marzo y agosto – septiembre llegando a un pico en los meses de abril – mayo y octubre - noviembre siendo los meses donde se presenta la mayor intensidad de lluvia y humedad en la región y la temperatura promedio se mantiene constante a lo largo del año entre los 15 – 16°C (Figura 51c), dicho comportamiento estacional representado en el modelo de este estudio, coincide con los trabajos desarrollados en diferentes regiones del país donde se ha planteado que el incremento de las infestaciones de garrapatas sobre el ganado podría presentarse en el período de transición seco-húmedo (Evans 1978, López 1983, Betancourt *et al.* 1984 y Betancourt y Cassalet 1995). *R (B) microplus* prefiere ambientes calientes y húmedos (Betancourt 2004), a pesar que el comportamiento estacional representado por el modelo resultante de este estudio, sigue la tendencia ecológica habitual de la especie en términos climáticos, hay que tener en cuenta el altiplano no cuenta con estas condiciones para ninguno de los trimestres agroclimáticos que se presentan en la región, ya que el primer trimestre seco tiende a ser más caliente y menos húmedo, mientras que el segundo trimestre tiende a ser más frío y más húmedo (Figura 52). De otro lado el comportamiento y la tendencia de la temperatura mínima de la región no se encuentra en el umbral que favorece el desarrollo adecuado de la especie, ya que de acuerdo al análisis de variabilidad climática realizado por CORPOICA 2012, la temperatura mínima promedio del altiplano se encuentra entre los 6°C - 8°C (Figura 53a), teniendo en cuenta que el límite crítico mínimo tolerado por la especie para un desarrollo exitoso es de 12 °C, es posible que los bajos valores de la temperatura mínima de la región contribuyan a interrumpir el desarrollo de las larvas, los huevos y el proceso de preoviposición, principalmente en los meses secos del primer trimestre húmedo ya que durante este periodo se presentan heladas las cuales generan escarcha y no solo disminuirá la temperatura del aire si no que contribuirá a disminuir la del suelo. De otro lado, aunque la temperatura máxima de la región se encuentra en el rango de tolerancia para el desarrollo de la especie 22,5°C – 23,5°C (Figura 53b), no es suficiente para alcanzar un desarrollo ideal para esta especie, si se considera que el rango óptimo para el desarrollo de *R (B) microplus* se encuentra entre los 25°C – 28°C (Davey 1988, Davey y Cooksey 1989, Hitchcock 1955, Mount *et al.* 1991 Teel 1984).

La simulación del ciclo de vida con respecto a la variación de las condiciones climáticas de la región mediante la variación de los valores temperatura y la precipitación, condujo a concluir que los cambios previstos para la región bajo escenarios de cambio climático para el periodo 2011 – 2040 (IDEAM *et al.* 2015), podrían no favorecer un óptimo establecimiento de la garrapata en la región, más si su presencia la cual se debe más al factor hospedero que al mismo clima. La respuesta de la dinámica poblacional de *R (B) microplus* en la región frente a las condiciones de cambio climático previstas para la región reflejó una tendencia a la disminución más que al aumento de las poblaciones (Figura 49a - 49b - 49c), el incremento de temperatura promedio planteado para la región es de 1°C, al aplicar este aumento a las temperaturas promedio estas apenas superarían los 15 °C con valor máximo de 17°C, valor que no alcanza el umbral máximo óptimo para el desarrollo adecuado de la especie, en este mismo sentido, si se tiene en cuenta la temperatura máxima y se aplica este mismo incremento esta, apenas llegaría a los 24°C o 25°C siendo rangos insuficientes para lograr un desarrollo óptimo. Con respecto a temperatura mínima esta ni siquiera lograría llegar a los 10°C, dichas condiciones tampoco favorecerían el desarrollo de la garrapata en la región el valor mínimo crítico para su desarrollo. De otro lado, el incremento previsto de precipitación para la región produce descenso en las poblaciones de *R (B) microplus* (Figura 50b), lo que da lugar a plantear que las condiciones de humedad tampoco llegarían a ser favorables para la región, luego el efecto del cambio climático sobre esta especie en el altiplano cundiboyacense no tendría relevancia alguna, de acuerdo a los resultados del modelo planteado para este estudio.

En conclusión, Las condiciones de densidad del hospedero, configuración del paisaje y características climáticas propias de la región expuestas, este estudio daría lugar a concluir que a pesar de que se registren observaciones de *R (B) microplus* en la región, el altiplano no cuenta con las condiciones climáticas aptas para el desarrollo óptimo de la especie, que su distribución y presencia en la región podría estar más relacionada a la entrada del ganado de otras regiones y su desplazamiento a lo largo del altiplano que al clima; en este mismo sentido se puede plantear, que el altiplano puede llegar a ser una zona libre de este parásito con manejo y mecanismos de control y vigilancia adecuados aplicados al ganado que entra a la región.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

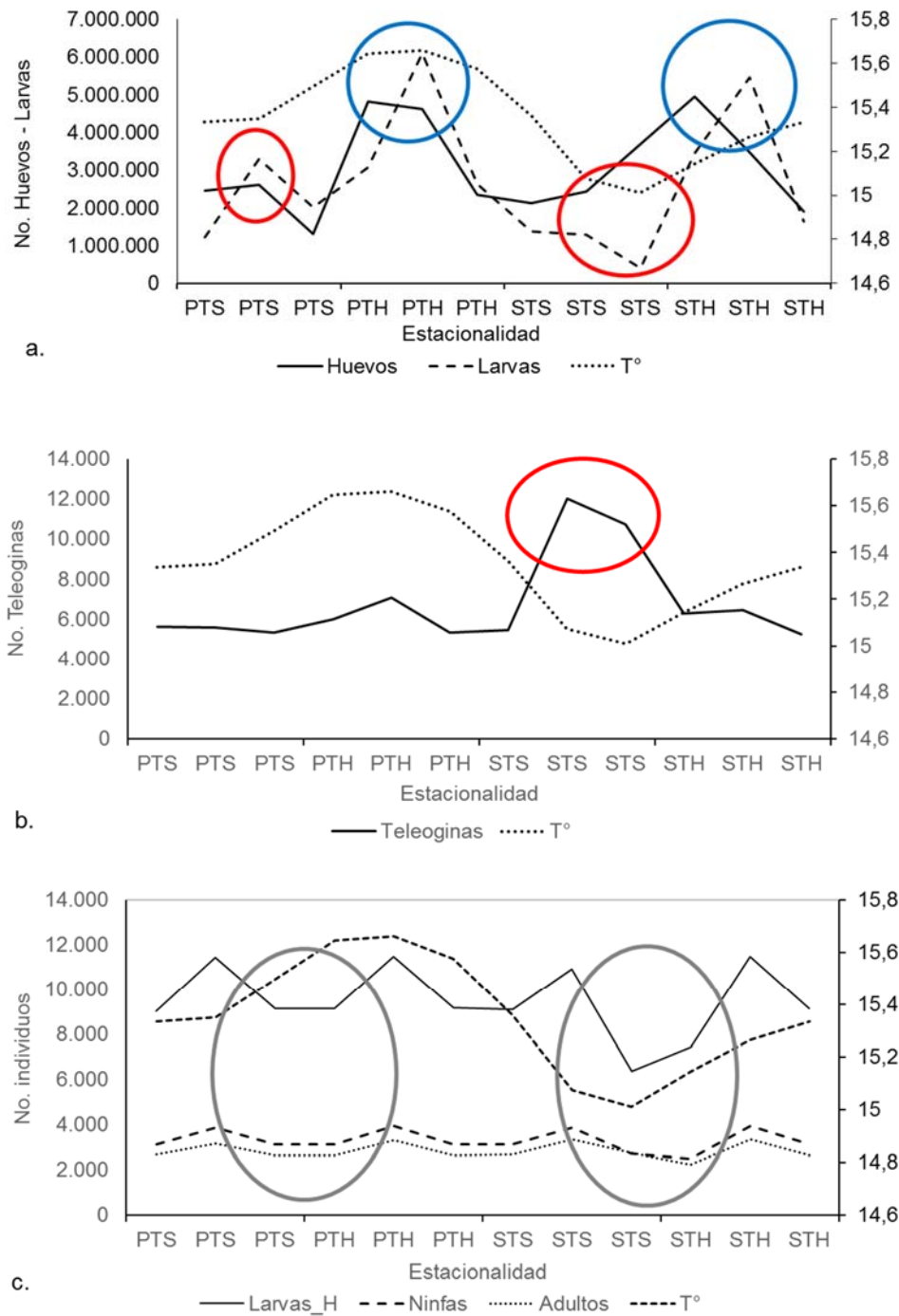


Figura 51. Comportamiento estacional de los estados de vida libre de la garrapata común del ganado *Rhipicephalus (Boophilus) microplus*, en el Altiplano Cundiboyacense. a. Huevos – larvas; b. Teleoginas. Elipses rojas, meses secos; elipses azules, meses húmedos.

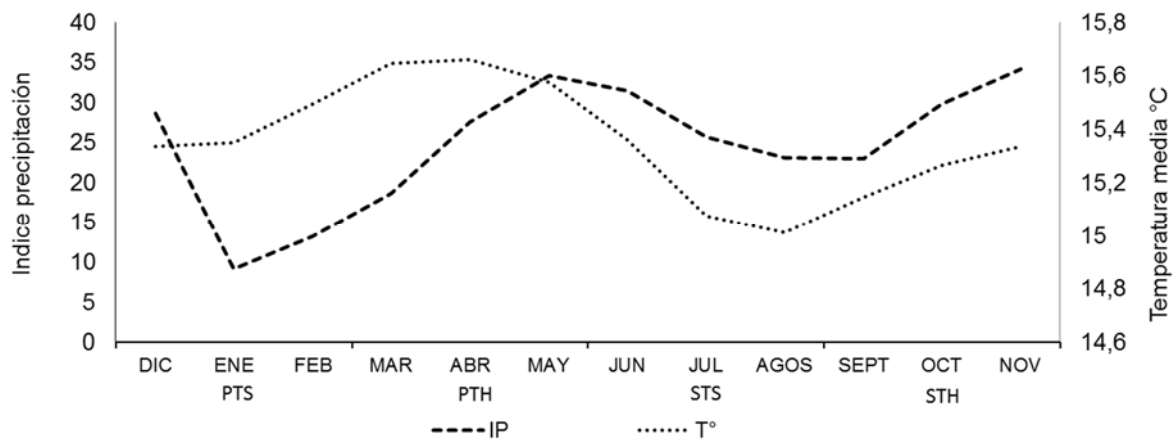


Figura 52. Comportamiento de la temperatura media anual y del índice de precipitación del Altiplano Cundiboyacense, para una tendencia de 30 años. Elaboración propia. Fuente: CORPOICA 2012.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

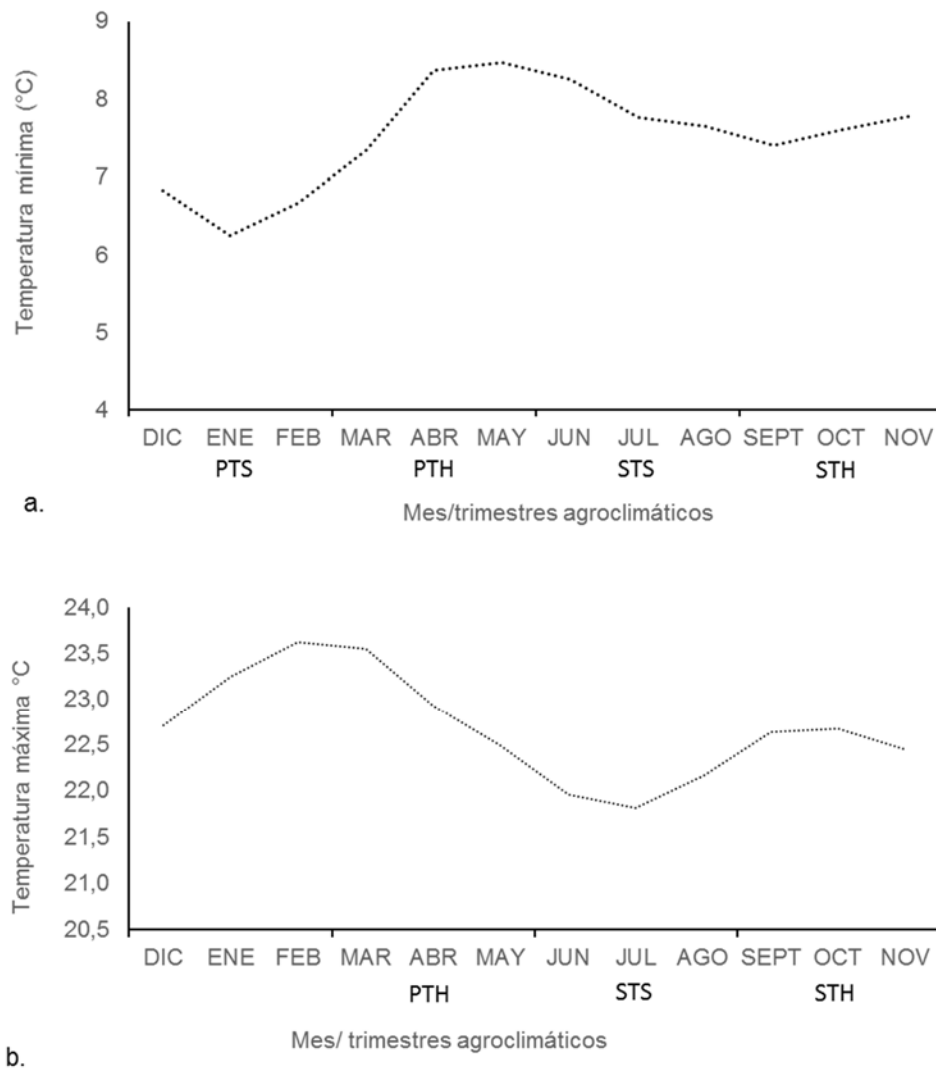


Figura 53. Comportamiento de la temperatura mínima promedio y de la temperatura máxima promedio en el Altiplano Cundiboyacense para una tendencia de 30 años. Elaboración propia. Fuente: CORPOICA 2012.

4.5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo del presente estudio involucró las características biológicas más importantes y relevantes de *R (B) microplus*, al ser el primer acercamiento en la región de la dinámica poblacional de esta especie con el componente espacial incluido, quedan vacíos y lecciones aprendidas que dan lugar a realizar las siguientes sugerencias de tal manera que pueda ser mejorado y que sean tenidas en cuenta en futuras aplicaciones y desarrollos:

- Para este modelo no se involucraron temperatura máximas ni mínimas solo la temperatura promedio, por lo incluir en futuros modelos estas dos temperaturas ayudaría a aumentar la certeza de los resultados.
- Actualizar la cobertura de usos de suelo que fue utilizada, ya que se utilizó la fuente utilizada fue para el año 2002.
- Incluir un componente que permita evaluar el nivel de adaptación de la garrapata, para lo que podría considerarse un componente de coevolución, a partir de la relación parasito- hospedero
- Realizar un análisis de métricas del paisaje que podría ayudar a definir de mejor manera los patrones de distribución asociados a lo configuración y heterogeneidad del paisaje de la región.

4.6. BIBLIOGRAFÍA

- Benavides, E. 1984. Biología oviposicional de la garrapata *Boophilus microplus* en condiciones de los Llanos Orientales Colombia. ICA (19), 25-32.
- Benavides, E., y Gonzáles, C. A. 1986. Programa de Parasitología Animal. ICA.
- Betancourt, J. E., Roqueme, L. y García O. 1984. Dinámica de población de *Boophilus microplus* en bovinos de Turipaná. XIV Congreso Nacional de Medicina Veterinaria y Zootecnia- Cartagena, octubre 10-14. En: Resúmenes de Trabajos Científicos.
- Betancourt, J. E., y Hernández, C. C. 1990. Observaciones sobre la fase no parasítica del ciclo biológico de *Boophilus microplus* en la meseta de Ibagué y el municipio de El Guamo, Tolima. Universidad del Tolima.
- Betancourt, J.A. 2004. Bioecología de las garrapatas en Colombia con énfasis en *Boophilus microplus*. Conferencia: Curso Taller sobre garrapatas para funcionarios de Tecnoquímicas. Bogotá. Septiembre 27.
- Betancourt, J. A. 2012. La garrapata puede colonizar altiplanos lecheros. Carta Federan (129), 56-58. Federación Nacional de Ganaderos.
- CORPOICA. 2011. Modelización del efecto del cambio climático sobre la distribución de la garrapata *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* en el trópico alto colombiano. Informe técnico final. C.I. Tibaitata. Mosquera, Cundinamarca.
- CORPOICA 2012. Plan para el manejo de los impactos en el sector agropecuario ocasionados por la emergencia Invernal. C.I. Tibaitata. 341p.
- Corson, M.S., P.D. Teel. y W.E. Grant. 2004. Microclimate influence in a physiological model of cattle-fever tick (*Boophilus* spp.) population dynamics. Ecological Modelling 180, 487–514.
- Cortés – Vecino, J.A., J.A. Betancourt Echeverri., J. J, Arguelles – Cárdenas y L.A. Pulido – Herrera. 2010. Distribución de garrapatas *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* en bovinos y fincas del Altiplano Cundiboyacense (Colombia). CORPOICA Cinch. Techno. Agropecu. 11(1): 73-84p.
- Davey, R.B y L.M. Cooksey. 1988. Sex ratios of *Boophilus* ticks (Acari: Ixodidae) reaching adulthood on cattle. J. Med. Entomol. 25: 82-84.
- Davey, R.B y L.M. Cooksey. 1989. Effects of prolonged exposure at low temperature on *Boophilus microplus* (Acari: Ixodidae). J. Med. Entomol. 26: 407-410.

- De Angelis, D.L. y V. Grimm. 2014. Individual-based models in ecology after four decades. F1000Prime Reports (6) 39: 1-6. <http://f1000.com/prime/reports/b/6/39>
- Estrada-Peña, A. 2001. Climate warming and changes in habitat suitability for *Boophilus microplus* (Acari: Ixodidae) in Central American. Journal of Parasitology, 87(5), 978-987.
- Estrada-Peña, A., C. Sánchez Acedo, J. Quílez, y E. Del Cacho. 2005. A retrospective study of climatic suitability for the tick *Rhipicephalus* (*Boophilus*) *microplus* in the Americas. Global Ecology and Biogeography (14), 565-573.
- Evans, D. E. 1978. *Boophilus microplus* ecological studies and tick fauna synopsis related to the developing cattle industries in the Latin American and Caribbean Region. PhD. Thesis, 283. United Kingdom: Cnaa/NE. Longpytechnic.
- Ginovart, M., Portell, X., Ferrer-Closas, P. y Blanco, M. 2012. Modelización basada en el individuo: una metodología atractiva para el estudio de biosistemas. Enseñanza de las Ciencias, 30 (2), pp. 93-108
- Grimm, V., Berger, U., Bastiansen, F., Eliassen, S., Ginot, V., Giske, J., Goss-Custard, J., Grand, T., Heinz, S.K., Huse, G., Huth, A., Jepsen, J.U., Jørgensen, C., Mooij, W.M., Müller, B., Pe'er, G., Piou, C., Railsback, S.F., Robbins, A.M., Robbins, M.M., Rossmanith, E., Rüger, N., Strand, E., Souissi, S., Stillman, R.A., Vabø, R., Visser, U., DeAngelis, D.L., 2006. A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. Ecological Modelling 198, 115–126.
- Grimm, V., U. Berger., D.L. DeAngelis., J. Gary Polhill., A. Giske., y S. Railsback. 2010. The ODD protocol: A review and first update. Ecological Modelling 221: 2760-2768.
- Guisande, C., A. Vaamonde. A. y A. Barreiro. 2011. Tratamiento de datos con R, SPSS y STATISTICA. Ediciones Díaz de Santos, Madrid.
- Hitchcock, L. F. 1955. Studies on the non-parasitic stages of the cattle tick, *Boophilus microplus* (Canestrini) (Acarina: Ixodidae). Aust. J. Zool. 3: 295-311.
- Hoch, T., Y. Monnet. y A. Agoulona. 2010. Influence of host migration between woodland and pasture on the population dynamics of the tick *Ixodes ricinus*: A modelling approach. Ecological Modelling 221 1798–1806.
- IGAC, SINCHI, IAvH, INVEMAR; CORMAGDALENA y UAESPNN. 2002. Mapa de coberturas de la tierra, línea base (2000 - 2002), metodología CORINE Land Cover (escala 1:100.000).

- IDEAM, PNUD, MADS, CANCELLERÍA. 2015. Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y temperatura para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones - Estudio Técnico Completo: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. 278 p. Bogotá, Colombia.
- López, G. 1983. ICA programa de Parasitología y Entomología Veterinaria. Bogotá.
- Mateus, G. 1981. I reunión de Directores de Salud Animal. RSANDINA I. Ponencias, Resultados, recomendaciones de Eventos Técnicos No. 240. Bioecología de Garrapatas (págs. 47-49). Bogotá: IICA.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 2006. Cabezas de Bovinos. Disponible en: <http://sigotn.igac.gov.co/sigotn/reporteMapaNuevo.aspx?prmAlls=217%3b7%3b2006%3b1%3b0%3b0%3b390575%3bCabezas+Bovinos%3b>. Consultado en Marzo 2014.
- Mount, G.A., Haile, D.G., 1987. Computer simulation of area-wide management strategies for the lone star tick, *Amblyomma americanum* (Acari: Ixodidae). Journal of Medical Entomology 24, 523–531.
- Mount, G. A., Haile, D. G., Davey, R. B., y Cooksey, L. M. 1991. Computer Simulation of Boophilus Cattle fever tick (Acari: Ixodidae) Populations Dynamics. Journal of Medical Entomology. 28(2), 223-240.
- Railsback, S y V. Grimm. 2011. Agent-Based an Individual – Based Modeling. A practical introduction. Princeton University Press. United Kingdom. 625pp.
- Sutherst, R. W., M. J. Dallwitz, K.B.W. Utech y J. D. Kerr. 1977. Aspects of host finding by the cattle tick, *Boophilus microplus*. Aust. J. Zool. 25: 159-174.
- Sutherst, R. W., R.B. Floyd, A.S. Bourne y M.J Dallwitz. 1986. Cattle grazing behaviors regulates ticks populations. Experientia 42. Birkhgüser Verlag, CH-010 Basel/Switzerland.
- Teel, P. D. 1984. Effect of saturation deficit on eggs of *Boophilus annulatus* and *Boophilus microplus* (Acari: Ixodidae). Ann. Entomol. Soc. Am. 77: 65-68.
- Teel, P.D., S. Marin y W.E. Grant. 1996. Simulation of host – parasite – landscape interactions: influence of season and habitat on cattle fever tick (*Boophilus* sp.) population dynamics. Ecological Modelling. 84: 19 - 30
- Teel, P. D., Marin, S., Grant, W. E., y Stuth, J. W. 1997. Simulation of host - parasite - landscape interactions: influence of season and habitat on cattle fever tick (*Boophilus* sp.). Ecological Modelling (97), 87-97.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

- Thompson, K. C. 1976. A technique to establish a laboratory colony of *Boophilus microplus* infected with *Babesia bigemina*. *Veterinary Parasitology*, 2, 223-229.
- Vincenot, CH.E., F. Giannino., M. Rietkerk., K. Moriya. Y S. Mazzoleni. 2011. Theoretical considerations on the combined use of System Dynamics and individual-based modeling in ecology. *Ecological Modelling* 222: 210-218.
- Wang, Hsiao-Hsuan., W.E. Grant P.D. Teel. 2012. Simulation of climate-host-parasite-landscape interactions: A spatially explicit model for ticks (Acari: Ixodidae). *Ecological Modelling* 243: 42-62.
- Wilensky, U. 1999. NetLogo. Northwestern University, IL. Obtenido de <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling

5. CONSIDERACIONES FINALES

Generar predicciones de distribución de especies que se expliquen desde la biología más que desde los supuestos que se pueden plantear en modelos de distribución de especies, fue el hilo conductor de este proyecto, donde se planteó la combinación de técnicas de modelamiento que permitieran abarcar no solo la distribución de la especie si no también la explicación sobre dicha distribución. Este planteamiento se abordó mediante la identificación del comportamiento poblacional de la garrapata *R (B) microplus*, a través de la generación de un modelo dinámico que representará la relación parásito – hospedero, lo cual permitió incorporar las principales características biológicas de la especie. La combinación de diferentes técnicas de modelamiento facilitó explicar porque la garrapata *R (B) microplus* se distribuye hacia las áreas Nor-orientales y Nor-occidentales del Altiplano Cundiboyacense (Figura 16 – Figura 54), desde una respuesta biológica que involucra procesos ecológicos que viabilizan esta distribución.

El modelo basado en agentes e individuos (MBAI) funcionó como un eje articulador entre dos puntos de vista sobre la presencia, distribución, establecimiento y comportamiento de una especie dada, en un lugar dado, representados inicialmente por los modelos generados en: **a.** el modelamiento de nicho ecológico (modelos fenomenológicos-estáticos) y **b.** modelamiento de sistemas dinámicos basados en compartimentos (modelo dinámico), lo cual permitió acercarse a la respuesta biológica del porque las áreas potenciales resultantes de los modelos de distribución se ubicaban en unas zonas y no en otras; además de facilitar la asociación de tipos de modelamiento con enfoques diferentes, independientes y parcialmente desarticulados entre sí, como las técnicas arriba mencionadas; ya que contribuyó a encaminar la explicación del resultado de un modelo de tipo fenomenológico desde la biología de una especie, la fortaleza del atributo espacial lo cual facilitó la representación y distribución geográfica local de la dinámica poblacional de *R (B) microplus*, como resultado de la construcción de la población y su dinámica, desde una perspectiva particular a una general, expresando la estructura del sistema, desde el individuo hasta la población y la misma comunidad, involucrando los procesos ecológicos más importantes requeridos para que esta distribución se posibilite.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

De acuerdo al planteamiento desarrollado en este proyecto, se abren las puertas para complementar los trabajos de distribución de especies desarrollados hasta ahora en Colombia, donde los proyectos y las investigaciones se han mantenido en la línea de asumir la distribución potencial de una especie desde un punto de vista exploratorio más que explicativo que proporcione más certeza y confianza en el momento de tomar decisiones en diversas áreas como epidemiología, agronomía y control de especies plaga, distribución de especies invasoras, especies endémicas o en alguna categoría de amenaza o vulnerabilidad.

En la Figura 54, se puede observar la complementariedad entre las técnicas de modelamiento utilizadas, donde el resultado obtenido de las simulaciones espaciales de la dinámica de población de la garrapata *R (B) microplus* para los estados de vida libre huevos, larvas y teleoginas, refleja que los mayores números de individuos coinciden con la localización de las áreas aptas resultantes del modelamiento de distribución de especies, ejecutados en Maxent y árboles de clasificación. Aunque los MBAI siguen siendo una técnica relativamente nueva y compleja, su exploración y combinación con los sistemas dinámicos y modelos fenomenológicos como los MDS, puede convertirse en una potente herramienta que contribuirá a explicar la distribución, presencia y establecimiento de las especies con un alto nivel de confianza, convirtiéndose en la estrategia propuesta en este proyecto para dar cuenta de la biología de las especies en los procesos de predicción de distribución de especies.

Aunque en Colombia no existe una Campaña Oficial de control de la Garrapata Común del Ganado, los modelos acá desarrollados pueden ser aplicados en la predicción de la introducción y establecimiento de esta especie en la zona, iniciando con las puertas de entrada identificadas y las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia y de preferencia de los diferentes estados de desarrollo (Figura 54 a-d); teniendo en cuenta, que si bien puede ser introducida con ganado o fómites, los modelos sugieren que no tendría establecimiento o diseminación importantes en los altiplanos. Esto significa que estas regiones continúan siendo de “Inestabilidad Enzoótica” para babesiosis bovina (transmitida por este artrópodo) y que eventuales episodios de introducción del parásito, pueden resultar en enfermedad clínica severa y aún mortalidad para los bovinos de los altiplanos lecheros.

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

De otro lado, este mismo tipo de metodología y técnicas podrían aplicarse a otras especies de artrópodos plaga, tanto de interés pecuario como agrícola y humano tales como, la mosca del nuche, *Dermatobia hominis*, restringida a zonas entre 400 y 2000 msnm, o los “Pitos” (Triatomidae) vectores de *Trypanosoma cruzi*, o de los mosquitos vectores de Encefalitis Equina, Filariasis, Malaria, Dengue, Chinkunguya, Zika y otras enfermedades. La posibilidad del empleo de los modelos tendría así grandes repercusiones en el diseño de estudios epidemiológicos de diversas patologías y en el control de las mismas y de sus vectores.

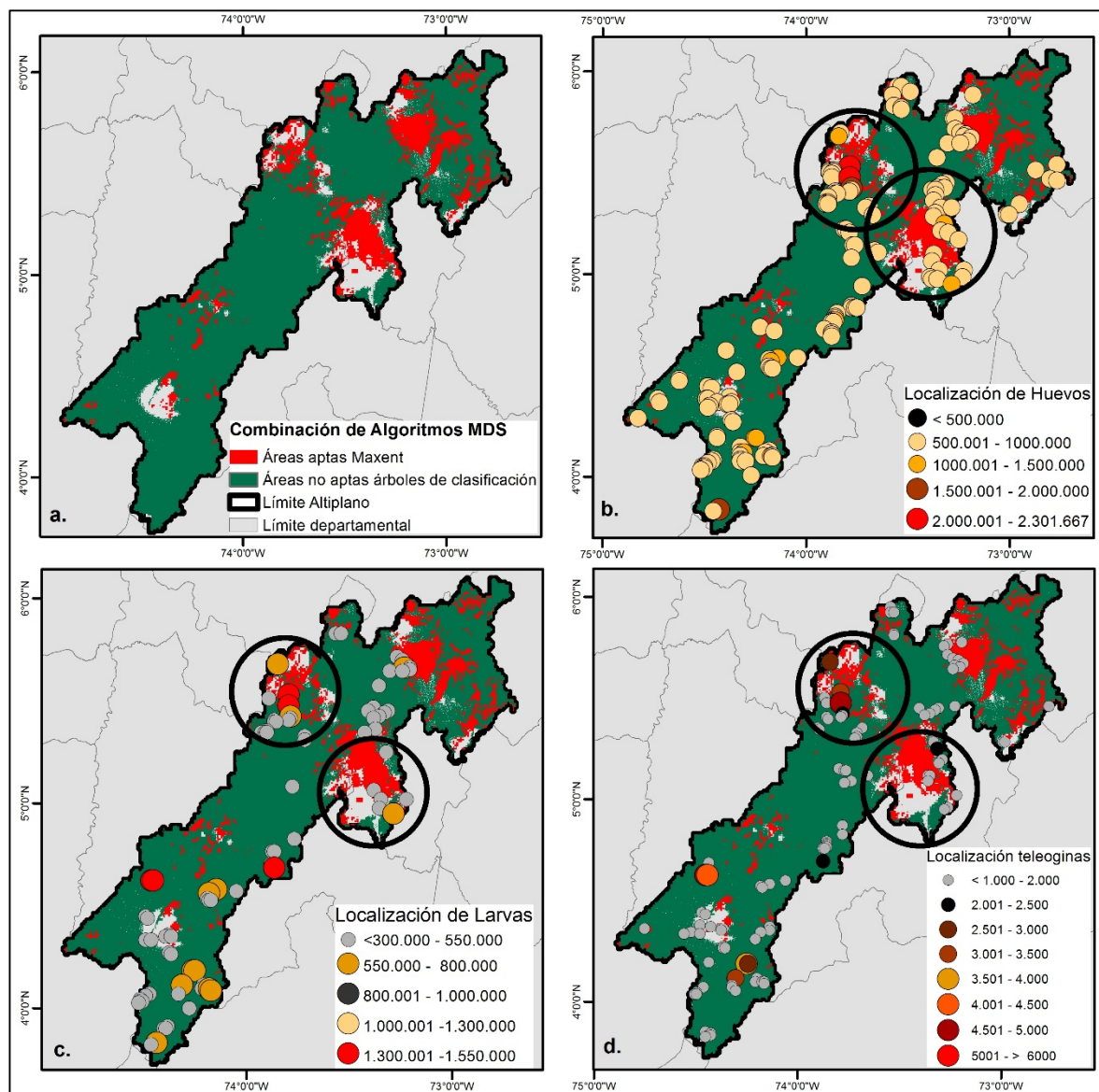


Figura 54. Resultados del modelamiento de distribución de especies y de la dinámica de población basada en agentes e individuos de la garrapata común del ganado *R (B) microplus* para el Altiplano Cundiboyacense. Los círculos resaltan como la preferencia de los estados de vida libre de la garrapata reflejada en los mayores valores de individuos, coinciden con las áreas potencialmente aptas resultantes de los modelos de distribución de especies desarrollados en el presente proyecto.

6. ANEXOS

6.1. ANEXO 1: ECUACIONES Y PARÁMETROS PARA EL SUBMODELO 1

Las Ecuaciones para el Submodelo 1. Están basadas en Mount *et al.* 1991.

*Con el asterisco se identifican los procedimientos desarrollados en este estudio. Las ecuaciones relacionadas con las variables climáticas, así como el coeficiente de resistencia del ganado fueron acogidas de Mount *et al.* 1991. El componente de paisaje se desarrolló como una variable auxiliar, transversal en el modelo de tal manera que se pudiera reforzar la explicación del desarrollo de los estados de vida libre. Por otro lado, las variaciones en las condiciones de clima, el paisaje y la densidad del hospedero, son desarrollos propios de este ejercicio. Así como como la conceptualización en *STELLA®* y la construcción de los parámetros para cada estado de desarrollo.

Tasas de sobrevivencia y desarrollo en el ambiente

1. Teleoginas en el ambiente

- a. La relación las hembras engordadas (Teleoginas) con las variables climáticas: temperatura (T), déficit de saturación (DS), índice de precipitación (IP) y el paisaje se generaron a partir de los siguientes parámetros:

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

Tipo de hábitat	Parámetros – ecuaciones
B/MS ₁ 1- 4 semanas	$1 - (((-0.00097222 * T^2 + 0.03111111 * T + 0.75111111) * (-0.00123643 * SD^2 + 0.01456543 * SD + 0.95708835) * (-0.00060557 * IP^2 + 0.0159513 * IP + 0.89479707)) * 0.974004)$
B/MS ₂ > a 4 semanas	$1 - (((-0.00114583 * T^2 + 0.036250 * T + 0.71333333) * (-0.00141020 * SD^2 + 0.01827455 * SD + 0.94021589) * (-0.00074267 * IP^2 + 0.0194957 * IP + 0.87183511)) * 0.8428791)$
C/H S ₁ 1- 4 semanas	$1 - (((-0.00097222 * T^2 + 0.03111111 * T + 0.75111111) * (-0.00123643 * SD^2 + 0.01456543 * SD + 0.95708835) * (-0.00060557 * IP^2 + 0.0159513 * IP + 0.89479707)) * 0.945742)$
C/H S ₂ > a 4 semanas	$1 - (((-0.00114583 * T^2 + 0.036250 * T + 0.71333333) * (-0.00141020 * SD^2 + 0.01827455 * SD + 0.94021589) * (-0.00074267 * IP^2 + 0.0194957 * IP + 0.87183511)) * 0.8096603)$
PAa S ₁ 1- 4 semanas	$1 - (((-0.00097222 * T^2 + 0.03111111 * T + 0.75111111) * (-0.00123643 * SD^2 + 0.01456543 * SD + 0.95708835) * (-0.00060557 * IP^2 + 0.0159513 * IP + 0.89479707)) * 0.897901)$
PAa S ₂ > a 4 semanas	$1 - (((-0.00114583 * T^2 + 0.036250 * T + 0.71333333) * (-0.00141020 * SD^2 + 0.01827455 * SD + 0.94021589) * (-0.00074267 * IP^2 + 0.0194957 * IP + 0.87183511)) * 0.7221155)$
B/M: bosques y mosaicos de pastos con bosques y cultivos; C/H: Cultivos y Herbazales; PAa: Pastos y áreas abiertas. S: Supervivencia	

- b.** Se calcula para los tres tipos hábitat categorizados en la región, a partir de la base de máxima de supervivencia en cada uno de ellos. *

Edad de supervivencia	Bosques/Mosaicos	Cultivos/Herbazales	Pastos – áreas abiertas
S ₁ 1- 4 semanas	0.9704004	0.945742	0.897901
S ₂ > a 4 semanas	0.8428791	0.8096603	0.7221155

Fecundidad:

La fecundidad se calcula a partir de la temperatura de la cual depende (12°C – 32°C) y el tipo de ganado.

$$F = -7487.5 + 790T - 14.5 T^2$$

Acumulación de grados de semana (AGS) $\geq 30^\circ\text{C}$

El umbral mínimo de desarrollo (D) = 15°C

2. Huevos:

- a. La relación del estado huevos con las variables climáticas: temperatura (T), déficit de saturación (DS), índice de precipitación (IP) y el paisaje se generaron a partir de los siguientes parámetros:

Tipo de hábitat	Parámetro – ecuaciones
B/MS ₁ 1- 4 semanas	$1 - (((-0.00097222 * T^2 + 0.03111111 * T + 0.75111111) * (-0.00123643 * SD^2 + 0.01456543 * SD + 0.95708835) * (-0.00060557 * IP^2 + 0.0159513 * IP + 0.89479707))) * 0.964264)$
B/MS ₂ > a 4 semanas	$1 - (((-0.00114583 * T^2 + 0.036250 * T + 0.71333333) * (-0.00141020 * SD^2 + 0.01827455 * SD + 0.94021589) * (-0.00074267 * IP^2 + 0.0194957 * IP + 0.87183511))) * 0.8344503$
C/H S ₁ 1- 4 semanas	$1 - (((-0.00097222 * T^2 + 0.03111111 * T + 0.75111111) * (-0.00123643 * SD^2 + 0.01456543 * SD + 0.95708835) * (-0.00060557 * IP^2 + 0.0159513 * IP + 0.89479707))) * 0.9362846)$
C/H S ₂ > a 4 semanas	$1 - (((-0.00114583 * T^2 + 0.036250 * T + 0.71333333) * (-0.00141020 * SD^2 + 0.01827455 * SD + 0.94021589) * (-0.00074267 * IP^2 + 0.0194957 * IP + 0.87183511))) * 0.8015637)$
PAa S ₁ 1- 4 semanas	$1 - (((-0.00097222 * T^2 + 0.03111111 * T + 0.75111111) * (-0.00123643 * SD^2 + 0.01456543 * SD + 0.95708835) * (-0.00060557 * IP^2 + 0.0159513 * IP + 0.89479707))) * 0.888922)$
PAa S ₂ > a 4 semanas	$1 - (((-0.00114583 * T^2 + 0.036250 * T + 0.71333333) * (-0.00141020 * SD^2 + 0.01827455 * SD + 0.94021589) * (-0.00074267 * IP^2 + 0.0194957 * IP + 0.87183511))) * 0.7148943)$

B/M: bosques y mosaicos de pastos con bosques y cultivos; C/H: Cultivos y Herbazales; PAa: Pastos y áreas abiertas. S: Supervivencia.

- b. Se calcula para los tres tipos hábitat categorizados en la región, a partir de la base de máxima de supervivencia*.

Edad de supervivencia	Bosques/Mosaicos	Cultivos/Herbazales	Pastos – áreas abiertas
S ₁ 1- 4 semanas	0.964264	0.9362846	0.888922
S ₂ > a 4 semanas	0.8344503	0.8015637	0.7148943

3. Larvas en busca del hospedero:

- a. La relación del estado larvas con las variables climáticas: temperatura (T), déficit de saturación (DS), índice de precipitación (IP) y el paisaje se generaron a partir de los siguientes parámetros.

Tipo de hábitat	Parámetro – ecuaciones
B/MS ₁ 1- 6 semanas	$1 - (((-0.00097222 * T^2 + 0.03111111 * T + 0.75111111) * (-0.00123643 * SD^2 + 0.01456543 * SD + 0.95708835) * (-0.00060557 * IP^2 + 0.0159513 * IP + 0.89479707))) * 0.9539088)$
B/MS ₂ > a 6 semanas	$1 - (((-0.00114583 * T^2 + 0.036250 * T + 0.71333333) * (-0.00141020 * SD^2 + 0.01827455 * SD + 0.94021589) * (-0.00074267 * IP^2 + 0.0194957 * IP + 0.87183511))) * 0.9154279)$
C/H S ₁ 1- 6 semanas	$1 - (((-0.00097222 * T^2 + 0.03111111 * T + 0.75111111) * (-0.00123643 * SD^2 + 0.01456543 * SD + 0.95708835) * (-0.00060557 * IP^2 + 0.0159513 * IP + 0.89479707))) * 0.9342157)$
C/H S ₂ > a 6 semanas	$1 - (((-0.00114583 * T^2 + 0.036250 * T + 0.71333333) * (-0.00141020 * SD^2 + 0.01827455 * SD + 0.94021589) * (-0.00074267 * IP^2 + 0.0194957 * IP + 0.87183511))) * 0.8982628)$
PAa S ₁ 1- 6 semanas	$1 - (((-0.00097222 * T^2 + 0.03111111 * T + 0.75111111) * (-0.00123643 * SD^2 + 0.01456543 * SD + 0.95708835) * (-0.00060557 * IP^2 + 0.0159513 * IP + 0.89479707))) * 0.9001101)$
PAa S ₂ > a 6 semanas	$1 - (((-0.00114583 * T^2 + 0.036250 * T + 0.71333333) * (-0.00141020 * SD^2 + 0.01827455 * SD + 0.94021589) * (-0.00074267 * IP^2 + 0.0194957 * IP + 0.87183511))) * 0.8516867)$

B/M: bosques y mosaicos de pastos con bosques y cultivos; C/H: Cultivos y Herbazales;
PAa: Pastos y áreas abiertas. S: Supervivencia

- b. Se calcula para los tres tipos hábitat categorizados en la región, a partir de la base de máxima de supervivencia*.

Edad de supervivencia	Bosques/Mosaicos	Cultivos/Herbazales	Pastos – áreas abiertas
S ₁ 1- 6 semanas	0.9539088	0.9342157	0.9001101
S ₂ > a 6 semanas	0.9154279	0.8982628	0.8516867

4. Factor de encuentro con el hospedero (FEH)

Se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$FEH = BTFEH * TE * DLA$$

Donde BTFEH es la base de la tasa de encuentro la cual está dada por la Densidad del Hospedero (DH), y un Factor de Ajuste (FA) luego:

$$BTFEH = (0.203777 * (DH^{0.514573}) * FA (0,08...0.1)$$

ET es el efecto de la temperatura sobre FEH:

$$ET = -0.008 * T^2 + 0.4 * T - 4$$

EDL es el efecto de la densidad de las larvas fuera del hospedero, DL es la densidad de las larvas en busca de hospedero representada como un acumulador del total de las larvas en el ambiente.

$$EDL = (-0.9 * \log_{10}(DL) + 5.5 > 0)$$

5. Ecuaciones para calcular variables climáticas.

- a. **Temperatura (T)**, corresponde a la Temperatura media semanal.
- b. **Déficit de saturación (DS):**

$$DS = SVP * (1 - RH/100)$$

Donde SVP es la saturación de vapor de presión y RH es la Humedad Relativa.

SVP se calcula a partir de la ecuación propuesta por la FAO (s.f.). Las unidades resultantes son *kPa*, hay que convertirlas a *mm/Hg*.

$$SVP = \left[\frac{e^{\circ}(Tmax) + e^{\circ}(Tmin)}{2} \right]$$

Dónde: $e^{\circ}(Tmax) = 0,6108 * \exp [17,27 * Tmax / Tmax + 237,3]$

$e^{\circ}(Tmin) = 0,6108 * \exp [17,27 * Tmin / Tmin + 237,3]$

c. Índice de precipitación (IP) =

$$IP_s = P_s + (IP_{s-1}) * (1 - L)$$

Dónde: **IP_s** es el índice de precipitación semanal; **P_s** es la precipitación semanal, y L es la tasa de pérdida de humedad semanal, L es un valor constante de 0.35, que corresponde a aproximadamente el 99% de pérdida en el índice en un período de 10 semanas.

d. Índice de precipitación bajos escenario de cambio climático:

$$IP_{2040} = IP_{lb} + 6.2$$

Dónde: **IP_{lb}** está dado por el Índice de precipitación de línea base arriba calculado y **6.2** es el valor de incremento para el escenario de cambio climático 2011 – 2040. Cálculos propios basados en las proyecciones IDEAM (2015).

6.2. ANEXO 2: ECUACIONES Y PARÁMETROS PARA EL SUBMODELO 2. BASADO EN MOUNT ET AL. 1991.

Tasas de sobrevivencia de los estados de vida sobre el hospedero

Las tasas de sobrevivencia y desarrollo para todos los estados de desarrollo sobre el hospedero están dadas por el tipo de ganado (TG), y la Densidad de las garrapatas (DG) por hospedero. Estos valores, se calculan con base en las tasas de sobrevivencia máximas y mínimas específicas para *Bos taurus* y *R (B) microplus*. A partir de un índice de exposición (IE) con un umbral mínimo de <1000 hasta ≤ 15000 , entonces:

a. Larvas sobre el hospedero

Cuando la densidad de las garrapatas (IE) < 1000

$$S_{L1} = 0.37$$

Cuando $IE < 1000$ (DG) $(IE) < 15000$

$$S_L = -0.000012 * DG + 0.382857$$

Cuando < 15000 (DG) (IE)

$$S_{L2} = 0.19$$

b. Ninfas sobre el hospedero

Cuando la densidad de las garrapatas (IE) < 1000

$$S_{N1} = 0.97$$

Cuando $IE < 1000$ (DG) $(IE) < 15000$

Modelos de distribución de especies en escenarios de tiempo y espacio

$$S_N = -0.0000253 * DG + 0.997143$$

Cuando < 15000 (DG) (IE)

$$S_{N2} = 0.59$$

c. Adultos sobre el hospedero

El tratamiento para los adultos tiene en cuenta la transición de ninfa a adulto, donde se utiliza una constante de separación de hembras y machos de 1.36:1. Los machos cuentan como un acumulador, pero no con estructura de edad.

Cuando la densidad de las garrapatas (IE) < 1000

$$S_{H1} = S_M = 0.79$$

Cuando IE < 1000 (DG) (IE) < 15000

$$S_H = S_M = -0.0000213 * D + 0.812857$$

Cuando < 15000 (DG) (IE)

$$S_{H2} = 0.47$$